

# **CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS EM BETÕES DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADOS COM FIBRAS**

**PEDRO LUÍS ARAÚJO SEIXAS DE SOUSA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professora Doutora Sandra da Conceição Barbosa Nunes

JULHO DE 2014

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais  
Aos meus irmãos

*Todas as vitórias ocultam uma ambição*  
*Simone de Beauvoir*

## **AGRADECIMENTOS**

Um primeiro agradecimento especial à minha orientadora Sandra Nunes pela paciência, persistência, dedicação, compreensão e apoio neste projeto mesmo quando eu nem sempre estive tão dedicado.

Um segundo agradecimento também este especial ao Filipe Ribeiro por todo o tempo e apoio prestado ao longo da execução desta dissertação.

Agradeço também à Paula Silva por todo serviço que me prestou no laboratório na resolução de problemas.

Aos meus pais, sempre presentes em todos os momentos, bons e maus, ao longo desta caminhada com muitos obstáculos, sendo que é a eles que dedico cada etapa ganha da vida.

Aos meus irmãos, que apesar de mais novos, dão todo um contributo de conforto e confiança, e me enchem o ego.

Agradecimento também especial ao João Ribeiro e Cristiana Silva pelo tempo despendido na ajuda prestada da elaboração da dissertação para meu único benefício.

Agradecimento a todos os meus amigos e família pelo apoio prestado nesta etapa, em especial a alguns mais presentes na elaboração desta dissertação, como Carlos Gomes, Bruno Costa, Emanuel Lourenço, Mariana Martins, Pedro Aires e Ricardo Rodrigues.

## **RESUMO**

Este estudo investiga a orientação e distribuição de fibras no betão de elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC). O UHPFRC é um material relativamente recente na construção, não havendo ainda um código de cálculo para dimensionar estruturas concebidas neste material.

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras é um material com propriedades únicas em relação aos betões convencionais, pois apresenta melhorias significativas de resistência à tração e compressão bem como uma maior durabilidade. Deste modo, a fim de perceber o efeito da contribuição das fibras no UHPFRC, realizaram-se ensaios mecânicos, através do “Double-Edge Wedge Splitting Test” (DEWST), bem como análises de imagens das amostras ensaiadas.

Os ensaios realizaram-se para amostras com um volume de fibras de 3%. O material das fibras é o aço e tem uma forma geométrica cilíndrica de 9mm de comprimento e 0.175mm de diâmetro. Na campanha experimental foram propostos três modelos de betonagem: um sem qualquer tipo de orientação das fibras, onde as fibras foram dispersas aleatoriamente e os outros dois com orientação magnética das fibras em duas direcções perpendiculares. Foram realizados dois moldes para cada um dos modelos de betonagem.

Através do ensaio DEWST obtiveram-se os valores da tensão de pico e abertura de fendas para cada uma das amostras. Após os ensaios realizou-se a análise de imagens de cada uma das amostras ensaiadas. A análise de imagem tem o objetivo de determinar o número de fibras de cada amostra e a respectiva área. Já quanto às características das fibras permite obter o diâmetro mínimo e máximo, inclinação destas em relação ao plano de corte e a respectiva área de cada fibra.

Face ao exposto foi possível observar se o método de orientação das fibras foi eficaz, para que possam ser melhoradas as características à tração deste material.

**PALAVRAS-CHAVE:** UHPFRC, orientação magnética, ensaio DWEST, análise de imagem, distribuição de fibras, resistência à tracção.

## **ABSTRACT**

This thesis investigates the orientation and distribution of fibers on UHPFRC. The ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) is a relatively new material used in construction, and as a consequence there is not still a design code for structures where this material is used.

The ultra-high-performance fiber reinforced concrete is a material with unique properties compared with more conventional types of concrete, since it presents significant improvements of tensile and compressive strength, as well as improved durability. That said, in order to understand the effects of the contribution of the fibers in UHPFRC, there were performed mechanic tests, through the use of "Double-Edge Wedge Splitting Test" (DEWST). Moreover, images of tested samples were analyzed.

The experiments were made out of samples with a volume of fibres of 3%. Fibers are made of steel and have a cylindrical shape of 9mm length and 0.175mm diameter. During the experimental campaign there were three proposed types of UHPFRC: one without any type of orientation of fibres, where all the fibres were dispersed randomly; the other two with magnetic orientation of the fibres in two perpendicular directions. There were made two different moulds for each one of the concrete types.

Through the DEWST experiments peak stress and the crack opening width for each one of the samples were attained. After the experiments, the pictures of each one of the tested samples were analysed. The analysis of the pictures has the goal of determining the number of fibres on each one of the samples and its area. When it comes to the features of the fibres it allows obtaining the minimum and maximum diameter, the inclination of these in relation to the cutting plan and the area of each fibre.

Taking all this into consideration, it was possible to observe if the method of orientation of fibers was efficient, so that the tensile strength of this material can be improved.

**KEYWORDS:** UHPFRC, magnetic orientation, DEWST experiments, image analysis, fiber distribution, tensile resistance



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. BETÃO AUTO COMPACTÁVEL DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS .....</b>	<b>3</b>
2.1. COMO SURTIU? O QUE É? .....	4
2.2. COMPOSIÇÃO .....	6
2.3. COMPORTAMENTO E CARACTERÍSTICAS .....	9
2.4. EXEMPLOS PRÁTICOS .....	12
<b>3. MÉTODO DE ORIENTAÇÃO DE FIBRAS .....</b>	<b>20</b>
3.1. FACTORES QUE INFLUENCIAM A ORIENTAÇÃO DE FIBRAS .....	20
3.2. DISPERSÃO DE FIBRAS .....	22
3.3. ORIENTAÇÃO POR FLUXO .....	24
3.3.1. ALGUNS MÉTODOS DE ORIENTAÇÃO POR FLUXO .....	25
3.3.1.1. Método de Young-Soo Yoon .....	25
3.3.1.2. Método de Su-Tae Kang e Jin Keun Kim .....	28
3.3.1.3. Método de L. Ferrara, M. Di Prisco e M. Lamperti .....	30
3.4. ORIENTAÇÃO MAGNÉTICA .....	34
3.4.1. ALGUNS MÉTODOS DE ORIENTAÇÃO MAGNÉTICA .....	35
3.4.1.1. Método de Björn Svedberg .....	35
3.4.1.2. Método de Ivar Miller .....	37
<b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>39</b>
4.1. ENQUADRAMENTO .....	39
4.1.1. ENSAIO UTILIZADO .....	40



4.1.2. MÉTODO DE ORIENTAÇÃO .....	41
4.1.3. RECOLHA E TRATAMENTO DE IMAGEM .....	44
<b>4.2. COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3. ENSAIO MECÂNICO .....</b>	<b>47</b>
<b>4.4. ANÁLISE DE IMAGEM .....</b>	<b>52</b>
4.4.1. RECOLHA DE IMAGENS .....	52
4.4.1.1. 1º Recolha de imagens das amostras sem orientação.....	54
4.4.1.2. 2º Recolha de imagens das amostras com orientação 0º.....	56
4.4.1.3. 3º Recolha de imagens das amostras com orientação 90º.....	57
4.4.2. ANÁLISE DE IMAGEM .....	59
4.4.2.1. 1ºAnálise de imagens das amostras sem orientação.....	59
4.4.2.2. 2ºAnálise de imagens das amostras com orientação 0º.....	60
4.4.2.3. 3ºAnálise de imagens das amostras com orientação 90º.....	62
4.4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO SCRIPT.....	63
<b>4.5. CORRELAÇÃO DE RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
 <b>5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	 <b>76</b>

## ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1 - PONTE, ROTERDÃO, HOLANDA, PORMENOR DO TABULEIRO DE ESPESSURA 60MM (FDN-ENGINEERING) .....	4
FIGURA 2 - PONTE DA PAZ, SEUL, COREIA DO SUL, TODA EM UHPFRC (ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL) .....	4
FIGURA 3 EXEMPLO DE UMA COMPOSIÇÃO TÍPICA DE UHPFRC (RIBEIRO & NUNES, BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS, 24-26 DE OUTUBRO DE 2012) .....	6
FIGURA 4 - EXEMPLO DE UMA MISTURA UHPFRC (RIBEIRO, BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS, 2013) .....	6
FIGURA 5 - EFEITO ESQUEMÁTICO DA AMOSTRA EM MICRO ANÁLISE (SCHMIDT & FEHLING, 2004) .....	7
FIGURA 6 - PONTE EM ALICANTE, ESPANHA, FEITA APENAS DE UHPC .....	9
FIGURA 7 - RESPOSTA DO UHPFRC A UM ESTADO DE TENSÃO UNIAXIAL (NEZHENTSEVA, SØRENSEN, ANDERSEN, & SCHULER, 2013).....	10
FIGURA 8 ULTRABRIDGE EXECUTADA PELA FDN-ENGINEERING NA HOLANDA, ROTERDÃO (FDN-ENGINEERING) .....	11
FIGURA 9 - ULTRABRIDGE EXECUTADA PELA FDN-ENGINEERING NA HOLANDA, EINDHOVEN (FDN-ENGINEERING) .....	12
FIGURA 10 - PORMENOR DO PAVIMENTO DA PONTE DE EINDHOVEN COM 0.4M DE ALTURA (FDN-ENGINEERING) .....	12
FIGURA 11- MUCEN EM FRANÇA, MARSELHA (MASES ENGINEERING SOFTWARE).....	13
FIGURA 12 - EXEMPLO DE ALGUMAS "COLUNAS ÁRVORE" NO MUCEN DE FRANÇA.....	14
FIGURA 13 - PORMENOR DOS PANEIS DA COBERTURA DO MUCEN DE FRANÇA, MARSELHA.....	14
FIGURA 14 - VISTA FRONTAL DO EDIFÍCIO DE MUCEN DE FRANÇA, MARSELHA.....	15
FIGURA 15 - ESTÁDIO JEAN BOUIN EM FRANÇA, PARIS .....	15
FIGURA 16 - PORMENOR DA COBERTURA DO ESTÁDIO JEAN BOUIN EM FRANÇA, PARIS .....	16
FIGURA 17 - PORMENOR DOS PAINÉIS DE FACHADA DO ESTÁDIO JEAN BOUIN FRANÇA, PARIS .....	17
FIGURA 18 - EXEMPLO DA DEFORMAÇÃO DE UMA MATRIZ: ANTES DO CARREGAMENTO; APÓS CARREGAMENTO. (KANG & KIM, 2011) .....	22
FIGURA 19 - MÁQUINA DESENVOLVIDA PARA DISPERSÃO DE FIBRAS (AKNZNWA, OKADA, & MIZOGUEHI, 1977) .....	22
FIGURA 20 - DISPERSÃO DAS FIBRAS: NO CASO (A) PARA UMA BETONEIRA, NO CASO (B) PARA UMA PLACA (AKNZNWA, OKADA, & MIZOGUEHI, 1977) .....	23
FIGURA 21 - ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS EM VÁRIOS CAMPOS DE FLUXO POSSÍVEIS (KANG & KIM, 2011).....	24
FIGURA 22 - DOIS MODELOS DE BETONAGEM ADOPTADOS: BETONAGEM NO CENTRO DA AMOSTRA (A); BETONAGEM NO CANTO DA AMOSTRA (B) (YOO, KANG, & YOON, 2014) .....	25
FIGURA 23 - DOIS MÉTODOS DE BETONAGEM UTILIZADOS: (A) DIREÇÃO PARALELA; (B) DIREÇÃO TRANSVERSAL.....	27
FIGURA 24 - EXEMPLO DE PROVETE QUE VAI SER ENSAIADO E RESPECTIVA MÁQUINA DE ENSAIOS À TRAÇÃO (YOO, KANG, & YOON, 2014) .....	28
FIGURA 25 - DIAGRAMAS DA TENSÃO DE TRACÇÃO PARA A OCORRÊNCIA DA PRIMEIRA FENDA NA DIRECÇÃO TRANSVERSAL E PARALELA DE BETONAGEM (YOO, KANG, & YOON, 2014).....	29
FIGURA 26 - DIAGRAMA DE TENSÃO DE TRACÇÃO MÁXIMA NA DIRECÇÃO TRANSVERSAL E PARALELA DE BETONAGEM (YOO, KANG, & YOON, 2014) .....	29
FIGURA 27 - COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA UTILIZADA (FERRARA, PRISCO, & LAMPERTI, 2010) .....	30
FIGURA 28- ILUSTRAÇÃO DOS FLUXOS TEÓRICOS POSSÍVEIS DE SEREM ADOPTADOS QUANDO FOR FEITA A BETONAGEM (FERRARA, PRISCO, & LAMPERTI, 2010) .....	31
FIGURA 29 ESQUEMA DO ENSAIO DO DEWST (FERRARA, PRISCO, & LAMPERTI, 2010).....	32
FIGURA 30 RESULTADOS DAS TENSÕES DE PICO OBTIDAS NOS ENSAIOS DO DEWST PARA OS DIFERENTES TIPOS DE BETONAGEM: (A) BETONAGEM NA DIRECÇÃO DAS TENSÕES; (B) BETONAGEM RADIAL (FERRARA, PRISCO, & LAMPERTI, 2010) .....	32

FIGURA 31 - CORTE EM 3D REPRESENTATIVO DA MÁQUINA DE MAGNETISMO (SVEDBERG, 1999) .....	34
FIGURA 32 - PORMENOR DO FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO MAGNÉTICO DE ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS (SVEDBERG, 1999) .....	35
FIGURA 33 - PORMENOR DO FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO MAGNÉTICO COM REFERÊNCIA À POSIÇÃO FINAL DAS FIBRAS TODAS NA MESMA DIRECÇÃO (SVEDBERG, 1999) .....	35
FIGURA 34 - PERFIS LONGITUDINAIS DO ELECTROÍMAN COM AS DUAS POSSIBILIDADES DE ORIENTAÇÃO DE FIBRAS: À ESQUERDA ORIENTAÇÃO HORIZONTAL; À DIREITA ORIENTAÇÃO VERTICAL (MILLER, DANDERYD, & BJORKLUND, 1975) .....	36
FIGURA 35 - CORTE TRANSVERSAL NO ELECTROÍMAN (MILLER, DANDERYD, & BJORKLUND, 1975) .....	36
FIGURA 36 - ESQUEMA DE FORÇAS DO ENSAIO DEWST (RIBEIRO, 2013) .....	40
FIGURA 37 - EXEMPLO DE UMA BOBINE COM O RESPECTIVO CAMPO MAGNÉTICO [DOMICIANO MARQUES, 2013] .....	41
FIGURA 38 - ELECTROÍMAN EM "U" (RIBEIRO, 2013) .....	41
FIGURA 39 - DOIS TIPOS DE ORIENTAÇÃO DO MOLDE: PARA AS FIBRAS A 0º O MOLDE (A); PARA AS FIBRAS A 90º O MOLDE (B) .....	42
FIGURA 40 - MOLDE UTILIZADO PARA A BETONAGEM (A); DIMENSÕES DA PLACA QUE VAI SER ENSAIADA (B) .....	43
FIGURA 41 - INSTALAÇÕES DO LABEST, MICROSCÓPIO MULTIZOOM AZ100 E RESPECTIVO COMPUTADOR (RIBEIRO, 2013) .....	44
FIGURA 42 - EXEMPLO DE UMA AMOSTRA OBTIDA APÓS JUNÇÃO DAS IMAGENS OBTIDAS PELO MICROSCÓPIO (RIBEIRO, 2014) .....	45
FIGURA 43 - FOTOGRAFIA DO ENSAIO DEWST .....	47
FIGURA 44 PROVETE QUE OBTVEU O MAIOR VALOR DA TENSÃO DE PICO NO ENSAIADO, NO DEWST. ..	48
FIGURA 45 PROVETE QUE OBTVEU O MENOR VALOR DA TENSÃO DE PICO NO ENSAIADO, NO DEWST. ..	49
FIGURA 46 - (A) AMOSTRA DO ENSAIO DEWST; (B) PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA ANÁLISE DE IMAGEM, CORTE DA ZONA DESPREZÁVEL E RESPECTIVA DIVISÃO DA AMOSTRA PARA RECOLHA DE IMAGEM .....	52
FIGURA 47 - DIVISÕES E INDICAÇÃO DA FACE QUE VAI SER ANALISADA .....	52
FIGURA 48 - RECOLHA DE IMAGEM DA AMOSTRA "A" COM 3% FIBRAS SEM ORIENTAÇÃO .....	53
FIGURA 49 RECOLHA DE IMAGEM DA AMOSTRA "B" COM 3% FIBRAS SEM ORIENTAÇÃO .....	54
FIGURA 50 - POSSÍVEIS SECÇÕES DE CILINDRO: (A) CÍRCULO; (B) ELIPSE; (C) INTERSECÇÃO DO PLANO SECANTE OBLÍQUO COM UMA BASE; (D) INTERSECÇÃO DE PLANO SECANTE OBLÍQUO COM DUAS BASES .....	54
FIGURA 51 - RECOLHA DE IMAGEM DA AMOSTRA "C" COM 3% FIBRAS COM ORIENTAÇÃO 0º .....	55
FIGURA 52 - RECOLHA DE IMAGEM DA AMOSTRA "D" COM 3% FIBRAS COM ORIENTAÇÃO 0º .....	56
FIGURA 53 - RECOLHA DE IMAGEM DA AMOSTRA "E" COM 3% FIBRAS COM ORIENTAÇÃO 90º .....	57
FIGURA 54 - RECOLHA DE IMAGEM DA AMOSTRA "F" COM 3% FIBRAS COM ORIENTAÇÃO 90º .....	57
FIGURA 55 IDENTIFICAÇÃO DAS FIBRAS NA AMOSTRA "A", SEM ORIENTAÇÃO, ATRAVÉS DO ALGORITMO58	
FIGURA 56 IDENTIFICAÇÃO DAS FIBRAS NA AMOSTRA "B", SEM ORIENTAÇÃO, ATRAVÉS DO ALGORITMO59	
FIGURA 57 IDENTIFICAÇÃO DAS FIBRAS NA AMOSTRA "C", COM ORIENTAÇÃO 0º, ATRAVÉS DO ALGORITMO .....	60
FIGURA 58 IDENTIFICAÇÃO DAS FIBRAS NA AMOSTRA "D", COM ORIENTAÇÃO 0º, ATRAVÉS DO ALGORITMO .....	60
FIGURA 59 IDENTIFICAÇÃO DAS FIBRAS NA AMOSTRA "E", COM ORIENTAÇÃO 90º, ATRAVÉS DO ALGORITMO .....	61
FIGURA 60 IDENTIFICAÇÃO DAS FIBRAS NA AMOSTRA "F", COM ORIENTAÇÃO 90º, ATRAVÉS DO ALGORITMO .....	62
FIGURA 61 HISTOGRAMA DO PROVETE A 1º AMOSTRA, SEM ORIENTAÇÃO .....	65
FIGURA 62 HISTOGRAMA DO PROVETE A 2º AMOSTRA, SEM ORIENTAÇÃO .....	66
FIGURA 63 HISTOGRAMA DO PROVETE A 3º AMOSTRA, SEM ORIENTAÇÃO .....	66

FIGURA 64 HISTOGRAMA DO PROVETE A 4º AMOSTRA, SEM ORIENTAÇÃO .....	66
FIGURA 65 HISTOGRAMA DO PROVETE B, 1º AMOSTRA SEM ORIENTAÇÃO .....	67
FIGURA 66 HISTOGRAMA DO PROVETE B, 2º AMOSTRA, SEM ORIENTAÇÃO .....	67
FIGURA 67 HISTOGRAMA DO PROVETE B, 3º AMOSTRA, SEM ORIENTAÇÃO .....	67
FIGURA 68 HISTOGRAMA DO PROVETE B, 4º AMOSTRA, SEM ORIENTAÇÃO .....	68
FIGURA 69 HISTOGRAMA DO PROVETE C, 1º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 0º.....	68
FIGURA 70 HISTOGRAMA DO PROVETE C, 2º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 0º.....	68
FIGURA 71 HISTOGRAMA DO PROVETE C, 3º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 0º.....	69
FIGURA 72 HISTOGRAMA DO PROVETE C, 4º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 0º.....	69
FIGURA 73 HISTOGRAMA DO PROVETE D, 1º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 0º.....	69
FIGURA 74 HISTOGRAMA DO PROVETE D, 2º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 0º.....	70
FIGURA 75 HISTOGRAMA DO PROVETE D, 3º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 0º.....	70
FIGURA 76 HISTOGRAMA DO PROVETE D, 4º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 0º.....	70
FIGURA 77 HISTOGRAMA DO PROVETE E, 1º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 90º.....	71
FIGURA 78 HISTOGRAMA DO PROVETE E, 2º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 90º.....	71
FIGURA 79 HISTOGRAMA DO PROVETE E, 3º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 90º.....	71
FIGURA 80 HISTOGRAMA DO PROVETE E, 4º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 90º.....	72
FIGURA 81 HISTOGRAMA DO PROVETE F, 1º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 90º.....	72
FIGURA 82 HISTOGRAMA DO PROVETE F, 2º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 90º.....	72
FIGURA 83 HISTOGRAMA DO PROVETE F, 3º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 90º.....	73
FIGURA 84 HISTOGRAMA DO PROVETE F, 4º AMOSTRA, ORIENTAÇÃO 90º.....	73
FIGURA 85 CORRELAÇÃO OBTIDA ENTRE TENSÃO DE PICO E ORIENTAÇÃO MÉDIA COM UMA LINHA DE TENDÊNCIA LINEAR .....	74
FIGURA 86 CORRELAÇÃO OBTIDA ENTRE TENSÃO DE PICO E ORIENTAÇÃO MÉDIA COM UMA LINHA DE TENDÊNCIA EXPONENCIAL .....	75

## **ÍNDICE TABELAS**

TABELA 1 RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS DO DEWST PARA OS DOIS TIPOS DE BETONAGEM .....	33
TABELA 2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO E RESISTÊNCIA AO IMPACTO PARA OS DOIS TIPOS DE FIBRAS COM OU SEM ALINHAMENTO MAGNÉTICO (MILLER, DANDERYD, & BJORKLUND, 1975) .....	37
TABELA 3 COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS.....	46
TABELA 4 TABELA COM OS VALORES DA RESISTÊNCIA DE PICO, TENSÃO MÉDIA DE PICO E DESVIO DE PADRÃO.....	47
TABELA 5 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DE IMAGEM DA AMOSTRA A.....	63
TABELA 6 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DA IMAGEM DA AMOSTRA B.....	63
TABELA 7 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DA IMAGEM DA AMOSTRA C.....	63
TABELA 8 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DA IMAGEM DA AMOSTRA D.....	64
TABELA 9 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DA IMAGEM DA AMOSTRA E.....	64
TABELA 10 RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DA IMAGEM DA AMOSTRA F.....	64
TABELA 11 VALORES DOS RESULTADOS DE PICO E ORIENTAÇÃO MÉDIAS .....	74



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ÂMBITO E OBJECTIVOS DO TRABALHO

Todo o Engenheiro tem na sua génese o gosto por desenvolver projectos com grande nota arquitetónica, que se destaquem. No entanto, comumente, entre outros obstáculos, as propriedades dos materiais não permitem que determinado projeto seja concluído com sucesso. Numa visão genérica da construção moderna, torna-se basilar a utilização do betão para os mais variados tipos de construção, sendo até os dias de hoje o material mais utilizado na construção, com uma excelente resistência à compressão mas com inúmeras fragilidades quanto à sua resistência à tração e durabilidade.

Nas últimas duas décadas, tem sido feitos incríveis progressos na tecnologia do betão. No entanto, o desenvolvimento de pontos fortes do betão era inevitavelmente sempre acompanhado por uma rotura frágil que o limitava em determinadas aplicações.

Ainda assim, uma das invenções foi o desenvolvimento do betão de elevado desempenho UHPC. Este material impressiona pela elevada resistência à compressão que consegue atingir, na ordem dos 200MPa, e pela sua durabilidade. Por sua vez, devido a elevada densidade de empacotamento que comporta, proveniente da utilização exclusiva de micro-grãos, torna-se muito frágil. Este defeito pode ser anulado com a adição de fibras de aço que garantem uma grande resistência à tracção e durabilidade.

Para se entender como as fibras de aço são úteis, é necessário recuarmos uns anos atrás, onde o betão começou por ser a argila misturada com palha a qual se usava para preencher os espaços que ficavam entre as pedras. Essa palha funcionava como uma de linha de cozer a argila, o mesmo efeito que as fibras, que pretendem costurar as fissuras do betão.

O betão de elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC), com a sua elevada ductilidade, mesmo após fissuração, tem sido atraente e desafiador no uso de estruturas de Engenharia Civil, pois permite execução de projectos arquitectónicos com um coeficiente de esbelteza elevado e elevada resistência à tração e durabilidade. Além disso, este material contém mais vantagens de aplicação em relação ao betão convencional, sendo de mais rápida aplicação, pois não necessita de varões de aço nem respectiva montagem de armaduras e é auto-compactável, o que garante uma massa fluida viscosa que transporta com ela as fibras de aço e molda-se em toda a cofragem sem qualquer tipo de componente vibratória.

Por sua vez, este comportamento dúctil e resistente á tração são fortemente influenciados pelas propriedades das fibras, entre outras a geometria, fracção de volume, material, mas também pelo tipo de orientação destas. Um modelo ideal seria realizar um processo de betonagem com orientação das fibras para poder melhor a capacidade resistente do betão. Existem dois tipos de orientação desenvolvidos por autores: orientação por fluxo e orientação magnética.

Nesta dissertação é estudada a orientação magnética, dado que, através desta, serão feitas análises à tracção das amostras, através do ensaio DEWST (Double-Edge Wedge Splitting Test), com a respectiva abertura de fendas e também um tratamento de imagem dessas amostras que servirá para comprovar os resultados do ensaio à tracção e determinar características das fibras como o diâmetro, área, inclinação, entre outras.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo:

- Capítulo 1- retrata o âmbito e objectivos do trabalho;
- Capítulo 2 – apresenta o estado da arte do betão de elevado desempenho reforçado com fibras, quanto à sua origem, composição, comportamento e características e por fim exemplos práticos de aplicação;
- Capítulo 3 - intitulado de Método de orientação de fibras, vai abordar três modelos de orientação das fibras no betão de elevado desempenho;
- Capítulo 4 - disserta sobre a campanha experimental realizada onde se refere a composição usada, o tipo de ensaios realizados e as análises de imagens;
- Capítulos 5 – conclusões são apresentadas.



## 2.

### **Betão Auto Compactável de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras**

#### **2.1. Como surgiu? O que é?**

Os materiais compósitos têm sido utilizados ao longo dos anos, desde a antiguidade, na construção civil. Nos dias que correm, a sua utilização cresceu em diversas directrizes com os avanços e desenvolvimentos de novas tecnologias, o que permite aplicações em diversos tipos de elementos. Antes de podermos falar do betão de elevado desempenho, urge recuar uns anos para que se perceba a origem do mesmo. Na década de 1960 os betões com uma resistência à compressão por volta dos 800MPa eram desenvolvidos em laboratórios e produzidos sob condições específicas em ambiente controlado, com uma compactação sob alta pressão e tratamento térmico Schmidt, Fehling, (2004). Por meados da década de 1970, na Dinamarca, começaram as primeiras pesquisas sobre UHPFRC através do professor Bache, com base no desenvolvimento da tecnologia CRC Toutlemond, Resplendino (2011). Finalmente, na década de 1980, começou a surgir a ideia de desenvolver betões compactos com uma matriz de cimento muito densa e homogénea de forma a prevenir o desenvolvimento das microfissuras no interior do betão devido ao seu comportamento frágil quando carregado.

Devido ao tamanho restrito dos grãos, inferiores a 1mm, e da alta densidade de empacotamento que se obtinha por intermédio de diferentes adições minerais inertes ou reactivos foram chamados “Reactive Power Concretes (RPC)” Richard, Cheyrezy, (1995). Ao mesmo tempo, em França e também um pouco por todo mundo, o termo “Ultra-High-Performance-Concrete” começou a ficar estabelecido para betões com um comportamento mínimo de resistência à compressão entre 150MPa e os 250MPa.

Assim sendo, este material começou a ser utilizado em substituição do betão convencional, o betão de elevado desempenho (UHPFRC) oferece tecnologia para expandir e criar novos negócios com novos produtos e soluções que o betão convencional não conseguia. Deste modo, este material com a combinação de novas propriedades permitiu novos desafios para projectos, como formas complexas finas, curvaturas e texturas altamente personalizadas.



Figura 1 - Ponte, Roterdão, Holanda, pormenor do tabuleiro de espessura 60mm (FDN-Engineering)

O UHPFRC pode ser utilizado para as mais diversas aplicações arquitectónicas e estruturais, pois este é reforçado com fibras metálicas que contêm elevado teor de carbono, ou seja, além de poder ser usado em pontes ou construções pode também ser utilizado como revestimento de material mobiliário urbano, decoração e objectos de design. Segundo Richard e Cheyrzy, o UHPFRC representa o maior desenvolvimento de betão de alto desempenho (UHPFRC) e a sua resistência está dependente das condições de cura Richard, Cheyrezy, (1995).



Figura 2 - Ponte da Paz, Seul, Coreia do Sul, toda em UHPFRC (Engenharia Estrutural e Construção Civil)

Este material tem inúmeras vantagens tecnológicas e económicas quando comparado com o betão convencional, que é a alta resistência através da participação das fibras que garantem uma resistência à tracção mesmo após o aparecimento da primeira fissura na matriz cimentícia, redução de custos globais, como a cofragem, a mão-de-obra, a manutenção e a

velocidade de construção, baixa permeabilidade, alta resistência a ambientes agressivos, tem um ciclo de vida prolongado, resistência à fadiga, inibe o crescimento de bactérias e fungos e boa trabalhabilidade o que garante uma boa capacidade para superar desafios como, por exemplo, conchas e curvas e poder ficar exposto a ambientes agressivos, por exemplo em alto mar para suporte a torres eólicas ou pilares de pontes Nezhentseva, et al, (2013).

As fibras, por seu turno, permitem um reforço da matriz cimentícia em função das próprias propriedades destas e minimiza o comportamento frágil que é característico do betão. Assim este betão auto-compactável e de alto desempenho reforçado com fibras é um material mais dúctil, apresentando uma maior resistência à fendilhação e mesmo quando fissurado continua a apresentar uma resistência residual.

É, no entanto, evidente que concomitantemente surgem inconvenientes. Particularmente, importa referir que o facto de ser um material novo, leva à desconfiança por parte das entidades responsáveis (empreiteiros e engenheiros) que apresentam sempre alguma relutância na utilização de materiais novos, principalmente se o seu custo, execução e oferta não for facilitado. Importa também ressaltar que, se as entidades responsáveis pela utilização prática do mesmo não considerarem que acrescenta uma mais-valia, terão naturalmente tendência a recusar a utilização da técnica. Assim, torna-se imprescindível uma maior divulgação de casos de aplicação, bem como das características técnicas deste material para que possam ter uma maior visibilidade e sejam utilizados com maior frequência.

Para combater este inconveniente em França foi elaborado uma recomendação pela AFGC (Association Française de Génie Civil), que consiste num dossiê que contém algumas regras necessárias para desenvolver o cálculo específico e também para começar a ser produzido algum trabalho de domínio público e assim poder ser integrado no projecto de estruturas.

## **2.2. Composição**

O facto de o UHPFRC ter um aumento de resistência e durabilidade em comparação com o betão convencional pode, na sua génese, advir da microestrutura material da matriz, bem como da disposição de fibras de forma homogénea que além de aumentar a resistência à tração.

O “Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete” (UHPFRC) é a combinação de fibras com betão de alta resistência, em que o betão é mais compacto que o tradicional, pois os agregados graúdos tradicionais são substituídos por areia fina e tem um baixo teor de água sendo adicionado superplastificante para conseguir a sua trabalhabilidade. A título de exemplo é mostrado na imagem seguinte uma composição típica de UHPFRC.

Materiais constituintes (kg/m <sup>3</sup> )	
cimento	810,60
silica fumo	81,06
filler calcário	317,58
areia fina	1040,00
água	156,80
superplastificante	11,16

Figura 3 Exemplo de uma composição típica de UHPFRC Ribeiro, Nunes, (2012).

A elevada resistência e durabilidade do UHPFRC provem de algumas características da composição. A reduzida relação água/cimento existente na amostra, cerca de 0.20, é uma característica que minimiza os poros capilares sendo que toda a água é usada para hidratação do cimento tornando a amostra mais densa e forte. Outra característica é a densidade de empacotamento, torna-se possível graças à utilização de grãos finos da matriz que permite um melhor arranjo das partículas e se preenchem quase todos os espaços reduzindo assim a procura de água da mistura para os restantes espaços vazios, aumentando a resistência à compressão bem como a fragilidade do betão. A figura seguinte é um exemplo de uma mistura de UHPFRC onde se observa homogeneidade e auto compactação do betão de elevado desempenho.

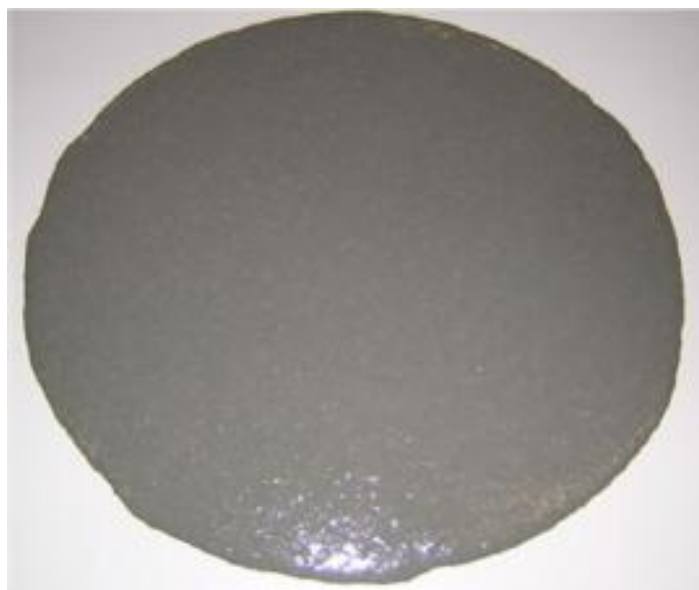


Figura 4 - Exemplo de uma mistura UHPFRC Ribeiro, (2013)

O baixo teor de água da mistura só é possível graças à adição de um superplastificante. A utilização do superplastificante é uma característica que vai tornar a mistura mais trabalhável e ao mesmo tempo mais resistente. Por fim, a utilização de fibras de aço para aumentar a tensão resistente de flexão, permitindo assim uma melhor resistência da estrutura à deformação mesmo quando solicitada em planos diferentes, ou seja, tornando mais dúctil.

No estudo de Ivan Markovic, foi investigada a influência à tração do teor de água presente na amostra. O autor usou uma mistura  $w/b=0.30$  e uma amostra de  $w/b=0.20$  e o tamanho de grão máximo de 1mm. Com as fibras de 13mm de comprimentos e diâmetro de 0.20mm comparou o comportamento de tracção das fibras numa matriz simples e uma matriz com reforço de fibras com 2% de volume. Os resultados demonstraram que a presença de fibras melhorou a força de tração em cerca de 20%-25% Markovic, (2006).

Importa referir que neste tipo de betões de elevado desempenho é importante que todas as partículas existentes estejam uniformemente distribuídas, daí a utilização do superplastificante e de uma boa misturadora com uma boa potência para se conseguir um material homogéneo.

No UHPFRC, se se pretender, ainda se pode reduzir mais no teor de água modificando o espectro granular, através da adição de partículas ultra-finas de pó de sílica (micro-sílica em pó) à mistura de betão que é cerca de 5 a 10 vezes mais pequena do que o tamanho das partículas do cimento. Com isto a amostra torna-se muito mais densa de partículas, pois os grãos, na ordem dos milímetros, preenchem os espaços entre os maiores grãos, tornando a mistura mais densa ou seja menos propícia à absorção de água, resultando numa elevada resistência à compressão.

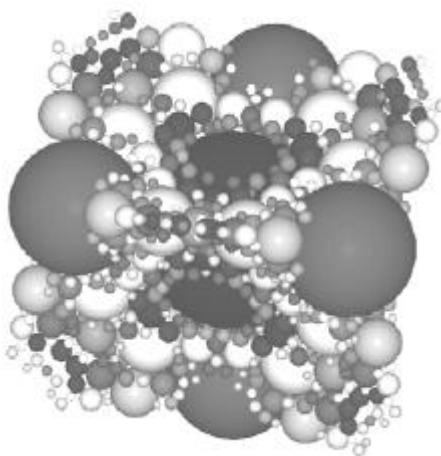


Figura 5 - Efeito esquemático da amostra em micro análise Schmidt, Fehling, (2004)

Assim, com a adição das partículas ultra-finas de pó de sílica o UHPFRC fica com a relação água/cimento na ordem dos 0.15, e torna-se um material mais homogéneo devido a uma menor diferença entre a rigidez dos agregados e da pasta de cimento. O maior grão é na ordem dos milímetros e é dada especial atenção à natureza do agregado, pois este deve apresentar resistência mecânica suficiente para evitar ser um ponto fraco na mistura.

Com esta formulação do UHPFRC, torna-se fácil atender a valores de força de compressão na ordem dos 150MPa. No entanto, urge salientar um importante factor adverso, dado que se torna um material mais frágil e explosivo em compressão. Para corrigir este problema, pode-se utilizar fibras de aço, que permitem dar a amostra um comportamento dúctil em compressão. Normalmente a dosagem anda em volta dos 1,5% em volume, para que se garanta um comportamento dúctil em flexão que permitem ter em conta ocorrências naturais, como por exemplo as microfissuras.

Referente agora às fibras utilizadas no UHPFRC, são elementos descontínuos de forma circular e de pequenas dimensões, em volta dos 15mm, e são produzidas em diferentes gamas. A maioria das fibras são de aço, existindo no entanto outros materiais como o carbono. Elas são lisas e tem determinadas propriedades mecânicas como a resistência à tracção, ductilidade, módulo de elasticidade, aderência, etc.

Como é sabido, a presença de fibras num compósito de betão influencia o tipo de resposta que se pode obter do mesmo. Com a adição destas no betão de uma forma homogénea, fará com que este exiba uma resposta quando solicitado à tracção muito superior, precavendo assim as fissurações típicas do material frágil que é o betão, melhorando assim a degradação do betão.

É claro que numa situação ideal as fibras têm um desempenho máximo quando orientadas no sentido da tracção, pois desta forma vão permitir costurar as microfissuras existentes no betão dando uma maior resistência. Assim o processo de betonagem torna-se vital na orientação das fibras como se verá mais à frente.

### **2.3. Comportamento e características**

Na primeira análise deste subcapítulo vamos tratar a retracção e a fluência, que segundo Jacques Resplendino, ao contrário do betão normal, o UHPFRC tem uma relação muito baixa de água/cimento, o que provoca muito elevada retracção autogénea, cerca de 550  $\mu\text{m}/\text{m}$ , e muito pequena retracção por secagem, cerca de 150  $\mu\text{m}/\text{m}$  por UHPFRC sem tratamento térmico. Já quanto ao coeficiente de fluência é comparável com o obtido pelo betão de elevado desempenho com sílica activa (fluência de longo prazo coeficiente que está entre 0,8 a 1,0) Toutlemonde, Resplendino, (2011).

O referido acima permite distinguir dois tipos de comportamento deste material: o betão de elevado desempenho sem fibras que é semelhante a um vidro, como material frágil, com um módulo de elasticidade relativamente elevado entre 50-70GPa e com uma resistência à tração da matriz típica na ordem dos 8MPa. O outro comportamento é o do betão de elevado desempenho reforçado com fibras de aço com um elevado módulo de elasticidade, cerca de 45GPa, sendo que a resistência à compressão mantém-se constante ou aumenta ligeiramente, enquanto a resistência à tracção, flexão, deformação bem como a ductilidade são significativamente melhoradas Schmidt, Fehling, (2004).

A resistência à tração do UHPFRC vai depender essencialmente do tipo e quantidade de fibras utilizadas, da orientação das fibras e da distribuição das fibras dentro da matriz mas também do tipo de forma do elemento estrutural. Estes aspectos devem ter sido em conta quanto à ductilidade do UHPFRC, sendo que, obviamente, quanto mais fibras mais dúctil.



Figura 6 - Ponte em Alicante, Espanha, feita apenas de UHPC

É no entanto evidente que, caso se pretenda um projeto em que o UHPFRC vai suportar toda a carga sem qualquer ajuda de armadura adicional passiva, o teor de fibras na amostra terá que ser suficientemente elevado para combater a rotura da estrutura como também controlo de pequenas microfissuras que são previsíveis de acontecer, devido ao comportamento frágil da matriz. É razoável que nestes casos um teor de fibras a rondar os 2,5% a 3% consiga corresponder satisfatoriamente quanto à resistência à flexão, à trabalhabilidade do betão fresco e ductilidade.

Se o objectivo for só para aplicação de armadura secundária, entenda-se secundária por armadura de distribuição e não de suporte à carga total, 1% de fibras podem satisfazer as necessidades, pois aqui o objectivo é dar uma maior margem de segurança e controlo da fissuração Schmidt, Fehling, (2004).

O maior desafio e o principal objectivo do UHPFRC e o que os vai distinguir dos outros betões é a sua resistência à tração. Como mencionado anteriormente, as fibras de aço aumentam a ductilidade, compressão, ainda que ligeiramente, e tracção, reduzindo assim a tendência típica para a fissuração. Segundo o estudo desenvolvido no departamento de Engenharia Civil na universidade de Aalborg,, o comportamento à tração do UHPFRC pode ser descrito em três fases principais Nezhentseva, et al, (2013):

1) “Linear-elastic response”: esta fase realiza-se até ao ponto em que o nível de tensão na matriz UHPFRC corresponde à resistência de tracção da matriz e a primeira microfissura que aparece;

2) “Pseudo strain hardening”: durante esta fase não há alterações microestruturais plásticas a acontecer, podendo ser chamada também “pseudo plastic”. Ao contrário, as deformações continuam a aumentar intensamente resultando assim o aparecimento de novas fendas pequenas (ou microfissuras) na matriz, enquanto a tensão de tracção uniaxial



não difere muito, ou aumenta consideravelmente mas mais lenta comparando com a “Linear-elastic response”. O processo de formação de microfissuras continua a multiplicar com a abertura de fibras a serem uniformemente distribuídas amarradas por fibras.

3) “Strain softening”: esta fase inicia-se quando uma das secções da matriz, a zona mais fraca, não conseguir transferir a tensão média com a mesma intensidade, o que significa que a capacidade foi atingida na matriz UHPFRC. Durante esta fase, as deformações locais na secção fraca começam a ocorrer levando a macro fissuras, juntamente com a diminuição geral das tensão e deformações que tendem a colocar-se noutras zonas da matriz. Isto conduz a que seja atingida a capacidade de deformação que normalmente corresponde a metade do comprimento da fibra mais longa.

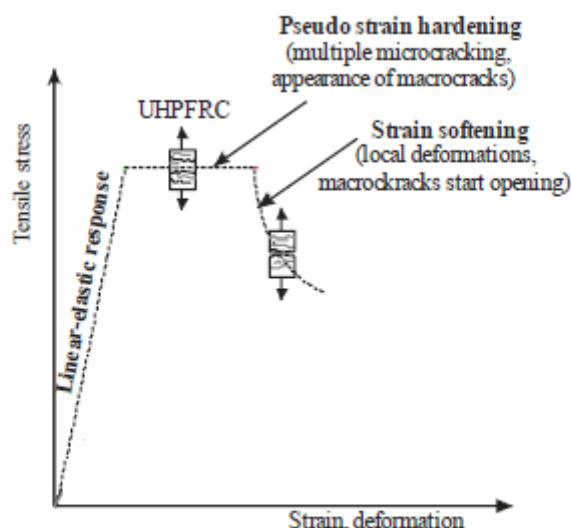


Figura 7 - Resposta do UHPFRC a um estado de tensão uniaxial Nezhentseva, et al, (2013)

Ao nível da resistência à compressão, o UHPFRC não tem grandes dispersões sobre os valores de resistência pois a qualidade e homogeneidade da amostra não permite grandes discrepâncias. Nota-se que os valores de resistência à compressão na ordem dos 150-250MPa sendo que com ou sem fibras os valores continuam neste intervalo, não tendo, portanto, as fibras incrementado nenhum aumento significativo de resistência à compressão.

Quanto à durabilidade o UHPFRC apresenta novamente maior resistência em comparação com os betões tradicionais. Esta melhoria acontece porque este tipo de betões são por natureza compactos e densos devido ao grãos mais pequenos e menos utilização de água que, deste modo, gera uma estrutura com ausência de porosidade e capilaridade. Esta característica dá um bom desempenho quando exposto a gases e líquidos de ambientes agressivos. Além disso, a resistência à abrasão e resistência a efeitos dinâmicos tornam este material convidativo a estruturas sujeitas a choques ou explosões até porque a presença das fibras impede o voo de partículas que poderiam colocar em perigo as pessoas na proximidade.



## 2.4. Exemplos Práticos

Um pouco por todo o mundo se encontram exemplos que demonstram que a utilização deste material tem um carácter global. As maiorias das construções com este tipo de material são bastante esbeltas e assumem formas geométricas não convencionais impossíveis de alcançar com o betão convencional. Exemplos disso são as duas pontes, construídas na Holanda, consideradas ambas ultrabridges, pela empresa holandesa FDN-Engineering.

A ponte que de seguida apresento, na cidade Roterdão, foi a primeira ponte a ser construída, em 2012, pela empresa suprarreferida e tem um comprimento total de 19m, com uma largura de 3,4m. Toda a ponte foi construída com apenas 9m<sup>3</sup> de betão de elevado desempenho C170/200 FDN-Engineering.

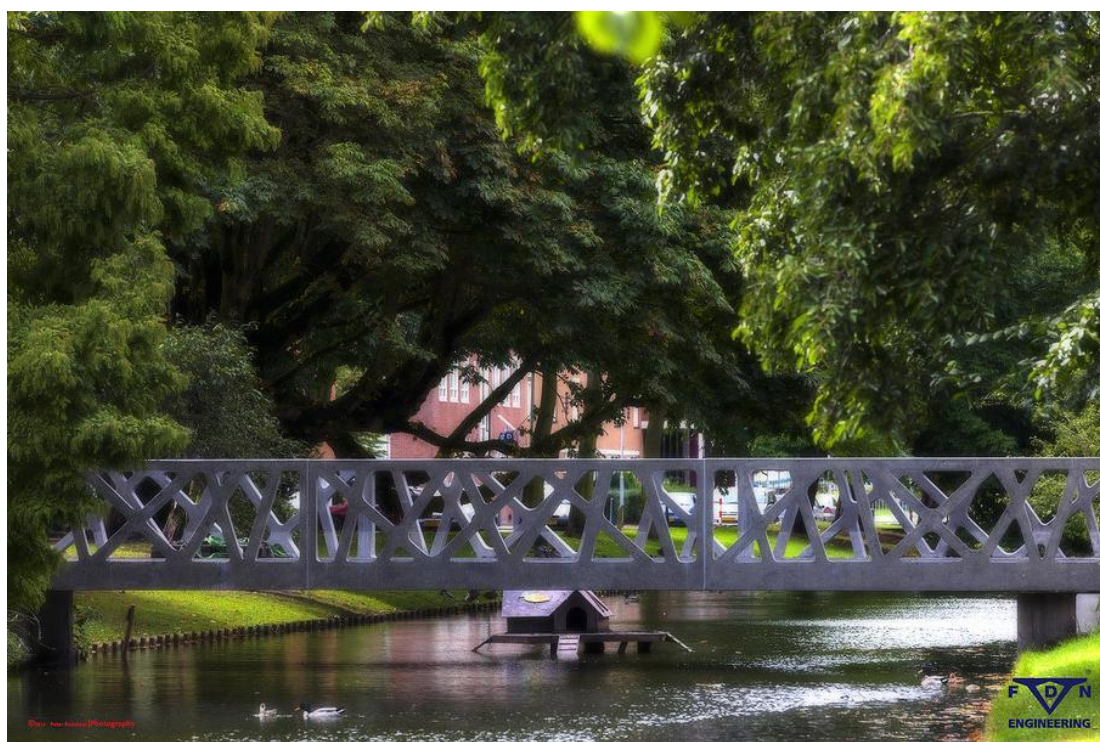


Figura 8 UltraBridge executada pela FDN-Engineering na Holanda, Roterdão (FDN-Engineering)

Ainda na Holanda, construída mais recentemente em Eindhoven, encontramos a ponte representada na seguinte imagem.



Figura 9 - UltraBridge executada pela FDN-Engineering na Holanda, Eindhoven (FDN-Engineering)

Com uma extensão de 26m e um pavimento pré-moldado, é uma caixa de viga com paredes de espessura entre 80mm a 100mm.

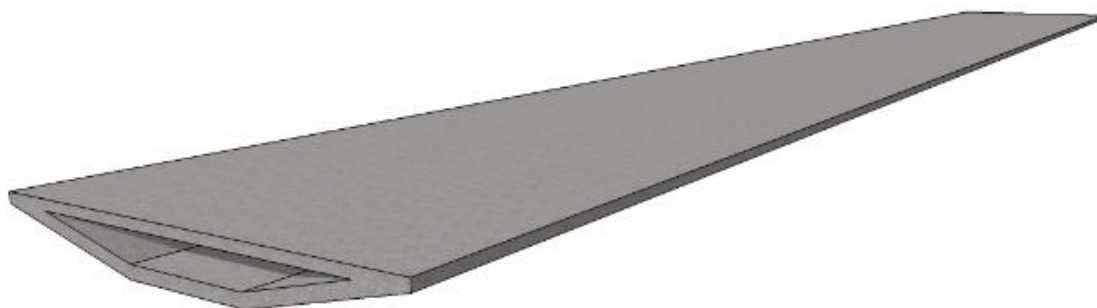


Figura 10 - Pormenor do pavimento da ponte de Eindhoven com 0.4m de altura (FDN-Engineering)

A altura da plataforma é de apenas 0.4m, daí a esbelteza da ponte ser de apenas  $1/65L$ , sendo “L” o vão da ponte. Também esta foi executada com betão de elevado desempenho, tendo este uma classe superior de C250/300.

Importa referir que todos os elementos de ambas as pontes são feitos a partir do betão de alto desempenho e são pré-esforçados em conjunto de forma a formar uma ponte. As “Ultrabridges” são baseadas num sistema de construção modular, de modo que as pontes até

30m de comprimento e 5m de largura podem ser construídas economicamente com dois elementos padrão: o elemento de treliça e o elemento de placa.

Em relação à treliça da ponte, de sublinhar que conjuga a função estética com a função de guia, para a placa do pavimento. A importância da treliça para a capacidade de carga total da ponte é determinada pelo projecto arquitectónico e padrão dos suportes. Dependendo do projecto, a treliça pode ser adicionalmente armada e pré-esforçada.

De acordo com o projeto, ambas as pontes foram concebidas para uma carga distribuída variável de  $5 \text{ kN/m}^2$ , atuante sobre todo o tabuleiro da ponte, e 120KN de carga pontual para manutenção de veículos de carga. Em termos de dimensões da plataforma, foi alcançada uma grande esbelteza. A espessura do pavimento aplicado é normalmente de 40-60 mm ( $1/60 L$ ), enquanto a espessura das placas de corrimão pode variar, mas de uma forma geral, não excede 120 mm. A espessura pode ser significativamente reduzida pois o recobrimento para este tipo de material é de apenas 10-15 mm.

De forma a alcançar a mais alta resistência à compressão possível, a proporção de água-cimento foi na ordem dos 0,16. A baixa porosidade e baixa permeabilidade permitiram considerar cobertura mínima, em torno de 10 mm, permitindo assim projectar elementos de betão muito finos.

Seguiremos agora para outro exemplo de aplicação eficaz deste material: o museu Mucem em França, na cidade de Marselha. O edifício tem um revestimento espectacular que podia ser feito em aço, mas o arquitecto Rudy Ricciotti decidiu fazer o mesmo em betão de elevado desempenho, UHPFRC, dado que é mais resistente à corrosão e, também, mais amigo do ambiente.

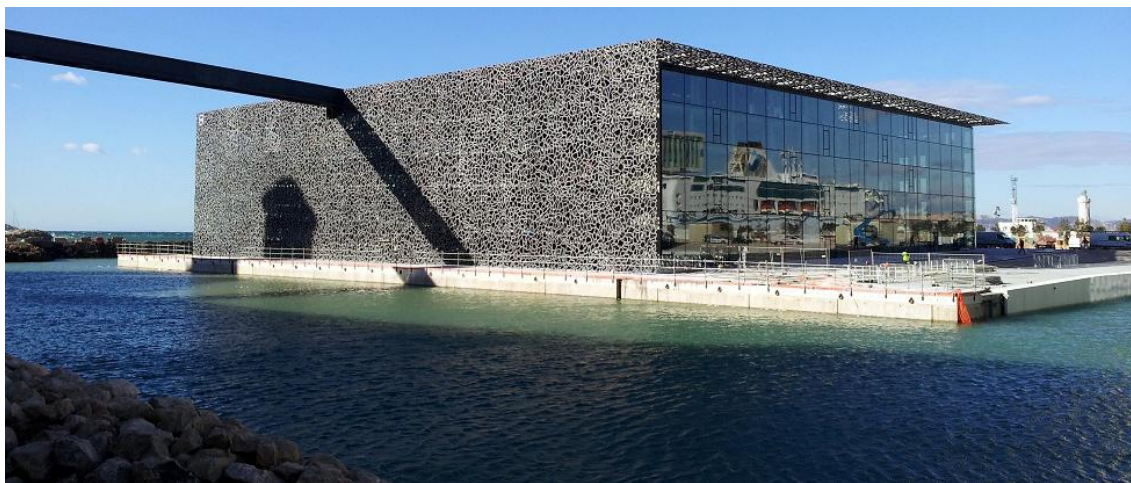


Figura 11- Mucem em França, Marselha (MASES Engineering Software)

Neste cubo de  $15000\text{m}^3$ , o betão é o elemento basilar e confere toda a resistência, elegância e leveza ao edifício. Devido a sua flexibilidade, delicadeza e alta resistência, o betão de elevado desempenho permitiu esta proeza arquitectónica, bem como alguns desafios técnicos do Mucem, como disso é exemplo as “colunas árvore”, que além de elegantes permitem grande espaço livre e resistem eficazmente a cargas de vento, bem como suporta cargas de piso.





Figura 12 - Exemplo de algumas "Colunas árvore" no Mucem de França (MASES Engineering Software)

Todo o revestimento do edifício é composto por 384 painéis pré-fabricados, que permitem a passagem de luz, bem como do odor a maresia, elemento que deve ter sido em conta, dado que o edifício está localizado na orla marítima de Marselha, ao lado de uma fortaleza do século XVII, Fort St Jean, que funciona como um eficaz quebra vento.



Figura 13 - Pormenor dos painéis da cobertura do Mucem de França, Marselha (MASES Engineering Software)

De referir que o edifício contém ainda 308 pilares em forma de árvore, que se encontram a mais de 8 metros de altura e formam a estrutura vertical do edifício, todos eles feitos em betão de elevado desempenho. O edifício é, ainda, construído em torno de um

quadrado perfeito (cada lado do edifício é de 72 metros). Um quadrado interno de 52 metros de cada lado forma o coração do museu e está organizado em três níveis com uma série de exposições, um auditório e uma livraria.



Figura 14 - Vista frontal do edifício de Mucem de França, Marselha (MASES Engineering Software)

Para terminar, apresentamos um último exemplo, também este da autoria de Rudy Ricciotti. O estádio Jean Bouin, situado frente ao famoso Parque dos Príncipes, foi conseguido graças a uma aplicação de betão de elevado desempenho que oferece combinações únicas de resistência, trabalhabilidade, durabilidade e estética, que permitiu construir uma “camada” exterior fina e leve, bem como um telhado à prova de água com 3600 painéis UHPFRC. Foi necessário um total de 18 moldes para produzir os 3600 painéis de UHPFRC.

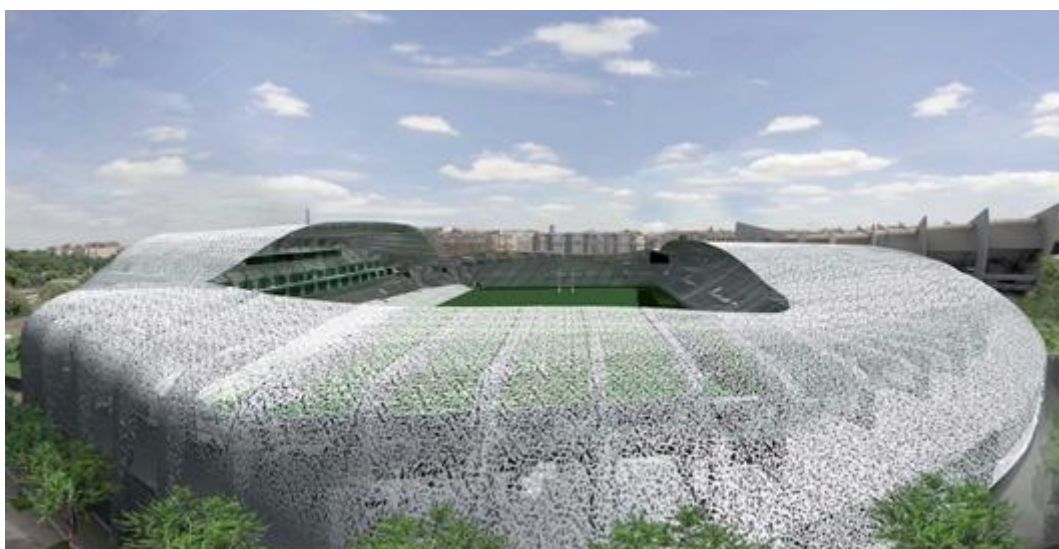


Figura 15 - Estádio Jean Bouin em França, Paris (MASES Engineering Software)



Esta camada exterior está dividida em três áreas principais que são:

- 1) Uma fachada perfurada, com painéis de treliça autoportantes que permitem a passagem de luz para o interior;
- 2) Painéis de transição entre o telhado e a fachada, com uma taxa de perfuração superior e maior curvatura;
- 3) O telhado, feito de 1.600 painéis com peças de vidro, tornando a cobertura impermeável.

Para que este projeto se tornasse viável foi necessário um meticuloso processo no sentido de criar um protótipo em escala real e expor a diversos ensaios em laboratório, como por exemplo a fadiga ao vento, choque térmico, geada, estanquidade à água na cobertura, entre outros, simulado para um período de vida útil da estrutura para 50anos.

Uma das exigências arquitectónicas e também inovação foi a cobertura com peças de vidro impermeável. De modo a obter uma eficaz produção dos painéis da cobertura, foram inicialmente posicionadas as peças de vidro dentro dos moldes e só numa fase posterior o mesmo foi betonado em volta com UHPFRC. Em relação à permeabilidade entre o vidro e o UHPFRC, esta foi garantida com uma junta de silicone em torno do vidro antes da betonagem.

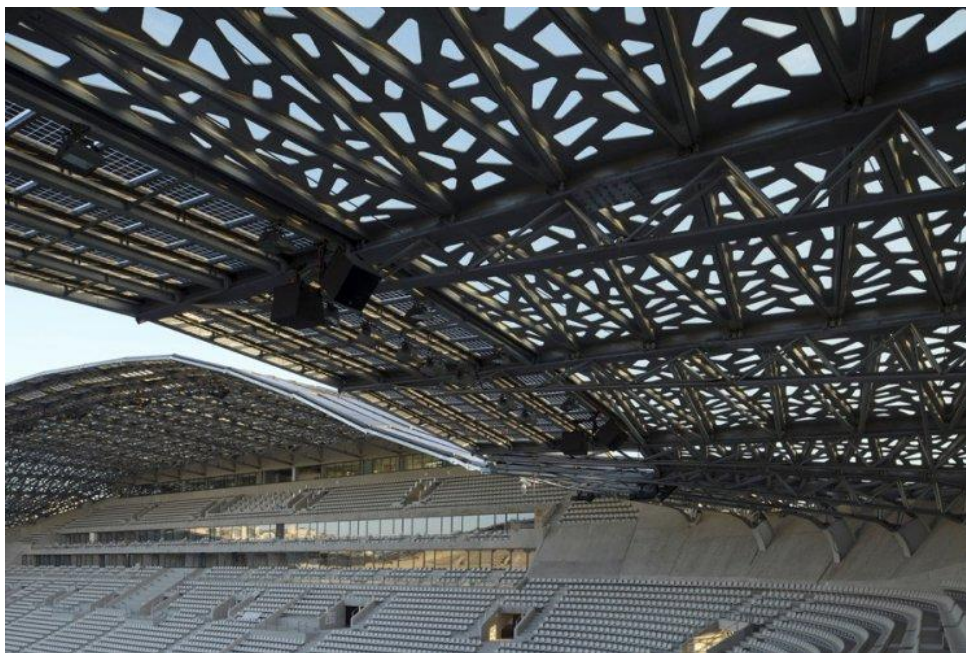


Figura 16 - Pormenor da cobertura do estádio Jean Bouin em França, Paris (MASES Engineering Software)

Também graças às garantias mecânicas dos UHPFRC, foi possível obter painéis triangulares com uma espessura reduzida, cada um com 20% a 27% de vidro. A espessura dos painéis da cobertura variou entre os 35mm a 45mm, contribuindo para uma dispersão direccional das fibras e com dimensões entre: 8mx2m e 9mx2.5m. Os painéis de fachadas (a malha exterior), contem uma espessura mínima de 11cm e dimensões de 9mx2.5m permitindo assim uma poupança de espaço livre.



Figura 17 - Pormenor dos painéis de fachada do estádio Jean Bouin França, Paris (MASES Engineering Software)





# 3

## Método de Orientação de Fibras

### 3.1. Factores que influenciam a orientação das fibras

De acordo com o que foi referido anteriormente, as fibras conferem uma maior resistência do betão às acções a que está sujeito, bem como à sua própria natureza frágil. Entende-se também que uma boa dispersão e orientação das fibras no compósito através de um processo de betonagem com a amostra fresca é uma maneira viável e de baixo custo de garantir melhores propriedades mecânicas, o que naturalmente irá conferir uma ainda maior resistência do betão de elevado desempenho. Deste modo, chegamos a um ponto basilar, que se centra na importância de concluir qual a melhor maneira/método de poder orientar as fibras para poder tirar o melhor proveito do conjunto fibra-matriz.

Assim, após pesquisa de artigos e dissertações de outros autores, começamos por concluir que as características das fibras, a dosagem de fibras, o método utilizado de betonagem e a “trabalhabilidade” da amostra vão influenciar directamente a qualidade do produto final Barnett, et al, (2009). Tornou-se também evidente, num modo geral, que as fibras assumem um comportamento aleatório disperso em todas as direcções, de modo a tornar-se num compósito isotrópico, mas que no entanto esse comportamento é fortemente influenciado por diversos factores como os referidos acima Kang, Kim, (2011).

O factor referente à dosagem de fibras tem especial importância em relação à viabilidade da amostra. É perceptível que existe um volume de fibras ideal/ótimo consoante o tipo de matriz, ao qual podemos chamar volume-critico. Nesta lógica, se numa amostra se colocar um volume exagerado de fibras, estas tendem a agrupar e perde-se o efeito pretendido, que passa pela ligação fibra-matriz. Importa acrescentar que, desse modo, se dificulta a trabalhabilidade da amostra, sendo que por outro lado, se a opção recair por colocar um volume reduzido de fibras, a capacidade resistente da amostra vai ser diminuta. Assim, conclui-se que para obtenção de uma amostra com qualidade tem que se ter um volume razoável de fibras, que no geral anda por volta de 1% para casos em que seja usada como armadura secundária.

No que diz respeito às características das fibras que vão afectar o comportamento à tracção do elemento e a distribuição de fibras (geometria, forma, fracção de volume, rigidez, módulo de elasticidade, ductilidade, aderência, densidade, entre outros) têm sido feitos estudos para avaliar o efeito das fibras nos esforços de tracção e flexão, entre os quais o aumento da proporção de fibras na matriz que garante uma maior resistência. No entanto, a má dispersão de fibras ou aglomeração de fibras podem ocorrer devido à forma e comprimento das mesmas Ferrara, et al, (2010).

Recentemente, concluiu-se que o desempenho à tracção é fortemente afectado pela orientação das fibras e a sua dispersão, assim como pelo processo de betonagem que deve ser razoavelmente concebido, de modo a que o reforço das fibras seja apropriado Ferrara, et al, (2010).

De acordo com um estudo desenvolvido por Doo-Yeal-Yoo, o coeficiente de dispersão de fibras, que é a capacidade de dispersão das fibras numa determinada matriz, diminui com o aumento do comprimento da fibra e com o local onde se faz a betonagem Yoo, e tal, (2014). Isto acontece devido à densidade do aço ser mais elevada que a viscosidade da matriz de argamassa Yoo, e tal, (2014). Também ficou evidente um alinhamento das fibras paralelamente à parede de extremidade. De sublinhar que através da função densidade de probabilidade, obtido pela análise de imagem, a orientação das fibras curtas tendem a ficarem mais alinhadas no sentido do escoamento do que as fibras mais longas. Conclui-o ainda que, a nível de cargas aplicadas no provete, que a resistência com as fibras curtas, 13mm, foi bastante animador quando comparado com fibras mais longas.

No entanto algumas questões se levantam, dado que se pretende a orientação das fibras, de modo a que se potencie este material. Nesse sentido, e com mais uns dados de pesquisa, foi possível descobrir que o fluxo pode realmente dar uma orientação às fibras. Assim, para prever a variação da distribuição das fibras ao longo do fluxo, é necessário, durante o processo de condução do fluxo, conhecer a forma geométrica das peças, as condições de colocação, a viscosidade do fluido, ou seja, varia mediante as características de escoamento Kang, King, (2011).

Após esta breve introdução, é agora possível propor alguns métodos de betonagem que consigam orientar as fibras na direcção pretendida para aumentar o desempenho à tracção da peça, deixando de ser um material isotrópico, onde as fibras assumem uma disposição aleatória, tornando-se anisotrópico, ou seja, assumindo as fibras uma determinada orientação direcção.

Tenha-se em conta, antes de prosseguir, que não se pode perder o verdadeiro foco deste material, que é o seu maior desafio e o faz distinguir radicalmente dos outros tipos de betão é a resistência à tração, ou seja, a capacidade resistente do material antes e após fissurar. Como tal, as características das fibras são importantes, dado que a orientação destas depende de diversos fatores suprarreferidos.

Em suma, com toda a informação obtida percebemos que não existe, por enquanto, a melhor solução para orientar as fibras, mas sim vários aspectos que se podem controlar, entre os quais o controlo das fibras num momento anterior à sua aplicação na peça final que nos pareceu o melhor procedimento ainda que muito pouco investigado, uma vez que os autores tendem a investigar o fluxo no molde de betonagem. Por outras palavras, urge conduzir as fibras para que cheguem à peça final devidamente alinhadas ou orientar depois de chegarem a peça através de orientação magnética.

### **3.2. Dispersão de fibras**

É fulcral realçar que, até ao momento, a maior parte dos estudos e pesquisas realizados por diversos autores tem incidido nas características e propriedades das fibras, focando-se na sua geometria, tipo e volume de fração. No entanto, é possível encontrar estudos para o efeito da distribuição das fibras, os quais são maioritariamente dedicados às características da distribuição como, por exemplo, a média de dispersão das fibras, ou a orientação das fibras ao longo dos compósitos, bem como as propriedades de tração. Entre os diversos estudos, realça-se o de aumento da proporção de fibras ou comprimento das fibras que garante uma força de ligação matriz-fibra superior, bem como uma resistência à fendilhação superior, no entanto surgiam problemas de dispersão, aglomeração e segregações.

Face ao referido, percebe-se que existe uma dificuldade no consenso entre a optimização deste material para o seu comportamento à tração e a falta de orientação das fibras. Esta constatação, leva-nos a considerar pertinente entender este tipo de situação como uma armadura de distribuição, armadura secundária, que vai ter inegáveis vantagens quando comparada com uma prática de armadura mais convencional. A incorporação de uma grande quantidade de fibras, de forma aleatória numa peça, garante uma grande ductilidade, que vai actuar no controlo da microfissuração quando exposto a uma tração e/ou flexão e controlo da deformação.

Antes de prosseguir, urge sublinhar que, antes que ocorra qualquer tipo de fissuração na matriz, durante as etapas de carregamento inicial, a interacção entre fibra e matriz é de natureza elástica Kang, Kim, (2011). A tensão desenvolvida na interface advém da deformação que é necessária para distribuir a carga externa entre as fibras e a matriz, sendo esta deformação elástica é o principal mecanismo a ser considerado para prever o comportamento à tracção da pré-fissuração betão. Esta distribuição da carga é não uniforme ao longo da amostra Kang, Kim, (2011).

O papel principal desempenhado pelas fibras é nas zonas de pós-fissuração uma vez que, mal ocorra fissuração, a matriz fendilhada não resiste mais à tração e ficam apenas as fibras a resistir a carga.

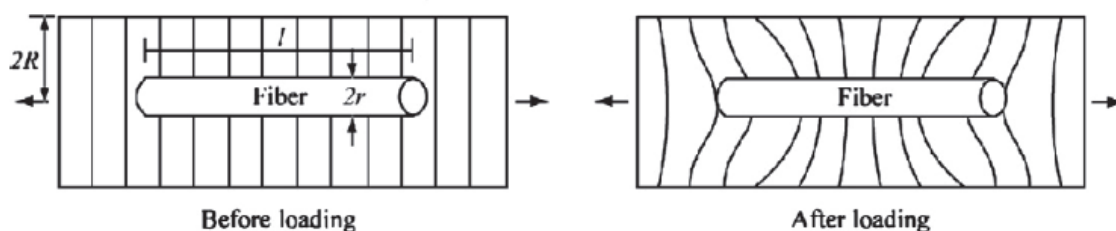


Figura 18 - Exemplo da deformação de uma matriz: antes do carregamento; após carregamento Kang, Kim, (2011).

Importa, de seguida, expor uma aplicação prática de betão de elevado desempenho reforçado com fibras sem qualquer tipo de orientação das fibras, sendo o mais importante aqui a dispersão destas. O método que passamos a apresentar foi produzido por Haluichi Akazawa, que criou um protótipo para fazer a dispersão de uma massa de fibras pelo betão Aknaznwa, e tal, (1977). Na figura 19, mostra a invenção que surgiu pela necessidade de produção de grandes quantidades de betão reforçado com fibras para grandes obras e haver apenas uma maneira de dispersar as fibras, com a “mão”. Deste modo, querendo fazer face as grandes produções e garantindo uma boa dispersão de fibras, como por exemplo colocação de 100Kg de aço num metro cúbico de betão, o investigador desenvolveu um disco rotativo que através da força centrífuga e passos radiais permite a dispersão das fibras.

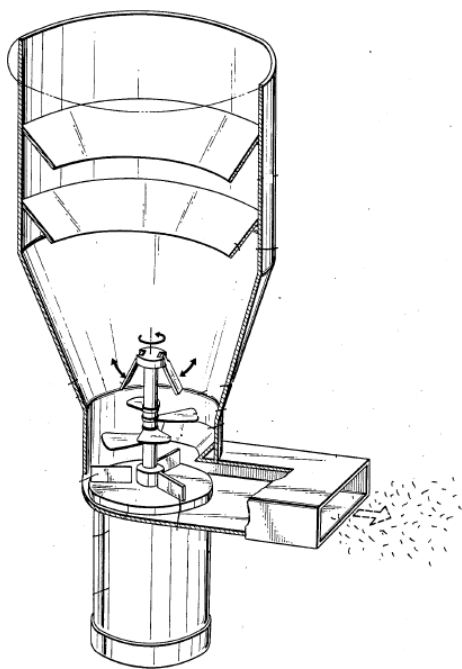


Figura 19 - Máquina desenvolvida para dispersão de fibras Aknaznwa, e tal, (1977).

Note-se, então, que o disco tem saliências radiais na superfície e é rodado por um motor. As fibras entram pela parte de cima já com o motor a laborar e começam de imediato a ser desembaraçadas dentro através das “pás” que o disco contém e também através de uma componente vibratória que ajuda na sua desaglomeração, sendo de seguida “expulsas” pelo único obturador de forma dispersa e separada.

Este pode ter vários modos de aplicação que é a dispersão de fibras directa para uma betoneira ou mesmo a sua dispersão para uma laje ou placa.

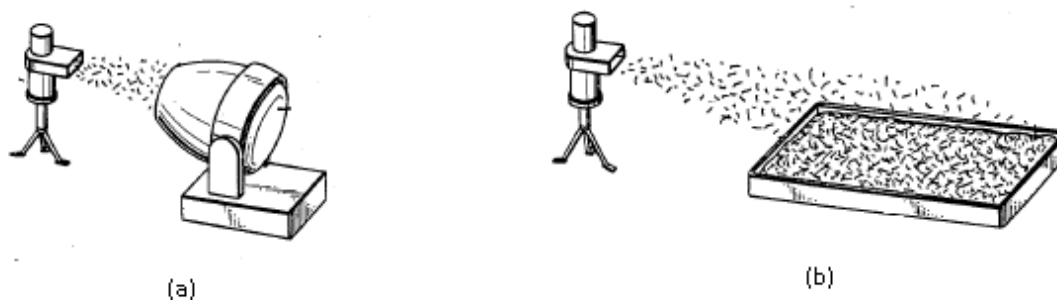


Figura 20 - Dispersão das fibras: no caso (a) para uma betoneira, no caso (b) para uma placa  
Aknaznwa, e tal, (1977).

### **3.3. Orientação por Fluxo**

Recentemente têm surgido estudos sobre o betão de elevado desempenho reforçado com fibras, para que as suas capacidades resistentes à tracção possam ser melhoradas. Com isto é possível realizar-se elementos estruturais em UHPFRC sem qualquer tipo de armadura adicional. Em particular, saliente-se a excelente ductilidade que este material tem mesmo após fissuração sob tracção e/ou flexão torna-o atraente à construção e desafiante.

No entanto este comportamento à tracção é afectado por inúmeros factores, tais como características das fibras e da matriz. Assim, ao usar-se o UHPFRC na infra-estrutura civil, o comportamento à tração deve ser cuidadosamente investigado. Embora muitos autores tenham investigado a tracção e comportamentos à flexão a maioria não considerou as características de distribuição e orientação das fibras. No entanto, o desempenho da tração é fortemente afectado pela orientação da fibra e a dispersão e, assim, o processo de betonagem deve ser razoavelmente concebido para expor o reforço de fibra apropriado Ferrara, (2010).

A elevada viscosidade e fluidez do UHPFRC vai fazer com que a orientação e distribuição de fibras seja mais dependente das características do escoamento que, por sua vez, depende de factores como a sequência de vazamento do material, forma da estrutura, etc. Por conseguinte, a orientação induzida por fluxo na distribuição das fibras não só influencia as propriedades mecânicas e o desempenho estrutural, mas também faz com que seja necessário tratar o UHPFRC como um material de características próprias Kang, Kim, (2011).

Desde o início da década de 1970 que existe investigação acerca da orientação e dispersão das fibras. No entanto, este campo era alvo de estudo na mecânica dos materiais compósitos, sendo poucos os estudos realizados no âmbito da mecânica dos fluidos Kang, Kim, (2011).

Se ao longo do fluxo de fluido se fizer uma mudança na distribuição e orientação das fibras é possível aumentar o desempenho estrutural e reduzir substancialmente a instabilidade do desempenho que pode surgir na estrutura quando não se controla a orientação da fibra, conseguindo assim uma maior confiança na concepção estrutural de peças de UHPFRC com

orientação das fibras. Assim, torna-se necessário perceber o campo de fluxo na colocação de um fluido viscoso e estudar o campo de escoamento.

Deste modo, durante o processo de moldagem de fluxo de argamassa de cimento é fortemente influenciado por vários factores: a forma geométrica da forma, as condições do processo de colocação (tais como posição e direção), reologia da argamassa, etc. Os campos de fluxo que podem ocorrer durante o processo de condução do fluxo de fluidos viscosos são geralmente os seguintes Kang, Kim, (2011):

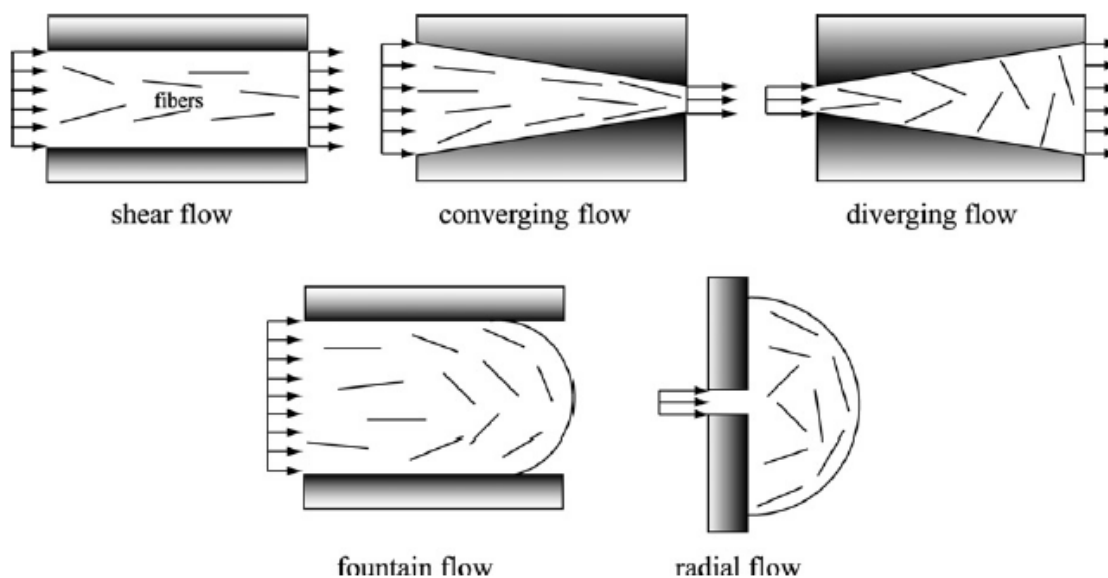


Figura 21 - Orientação das fibras em vários campos de fluxo possíveis Kang, Kim, (2011).

Assim, a principal preocupação não é descrever a orientação de uma fibra, mas sim a distribuição de orientação de todas as fibras, visto que o compósito é reforçado com numerosas fibras.

### 3.3.1. ALGUNS MÉTODOS DE ORIENTAÇÃO POR FLUXO

A fim de explicitar tudo o que foi referido atrás sobre a orientação das fibras por fluxo vão agora ser expostos alguns métodos desenvolvidos por autores que tiveram êxito na sua orientação.

#### 3.3.1.1. Método de Young-Soo Yoon

O primeiro método desenvolvido por Young-Soo Yoon, pretendia investigar o efeito do método de betonagem sobre o comportamento à flexão, propriedades de fendilhação e características da distribuição das fibras Yoo, et al, (2014).

Para investigar o efeito do comprimento das fibras, usou quatro tipos de fibras de diferentes comprimentos ( $L_f=13\text{mm}$ ,  $16.3\text{mm}$ ,  $19.5\text{mm}$  e  $30\text{mm}$ ) que foram incorporados em 2% volume. Os rácios de peso relativo para esta amostra foram de: 1.0 para cimento, 0.25 para água, 0.25 de sílica de fumo, 1.10 de areia, 0.30 de p  de sílica e 0.016 de superplastificante. O compósito foi feito com uma pré-mistura de água com plastificante que foi adicionado no estado onde se misturou ao longo de mais de 10min. Após a mistura se ter tornado fluida foram dispersas fibras de  o misturando durante mais 5min.

Foram adoptados dois métodos de colocação do betão em diferentes posições: no centro da provete e outra na esquina da provete.

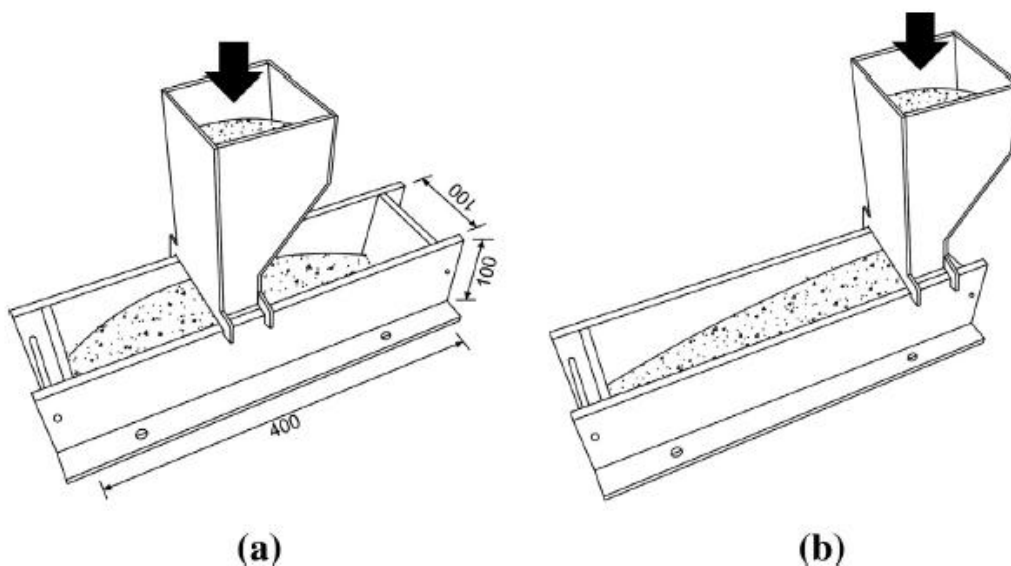


Figura 22 - Dois modelos de betonagem adoptados: betonagem no centro da amostra (a); betonagem no canto da amostra (b) Yoo, et al, (2014).

Todas as amostras foram cobertas após betonagem e curadas a temperatura ambiente durante 48h. Como se verifica na imagem, o UHPFRC foi fluído pelo um molde de  o em forma de cone. O molde foi então levantando lentamente para permitir o betão fluir por toda a amostra. Após a betonagem retirou-se um total de 12 amostras cilíndricas para ensaios com um diâmetro de 100mm e 200mm para ensaios de compressão e flexão.

O comportamento   compressão bem como o módulo de elasticidade das amostras foi muito pouco influenciado pelo comprimento das fibras. A maior resistência   compressão foi 204,5Mpa para a amostra com fibras de comprimento 16,3mm, mas não diferiu mais de 4% em relação as restantes amostras. Quanto ao módulo de elasticidade as fibras de comprimento 13mm e 30mm apresentaram um módulo de elasticidade médio de 50,3GPa que foi sensivelmente maior 9% que as restantes amostras com 16.3mm e 19.5mm.

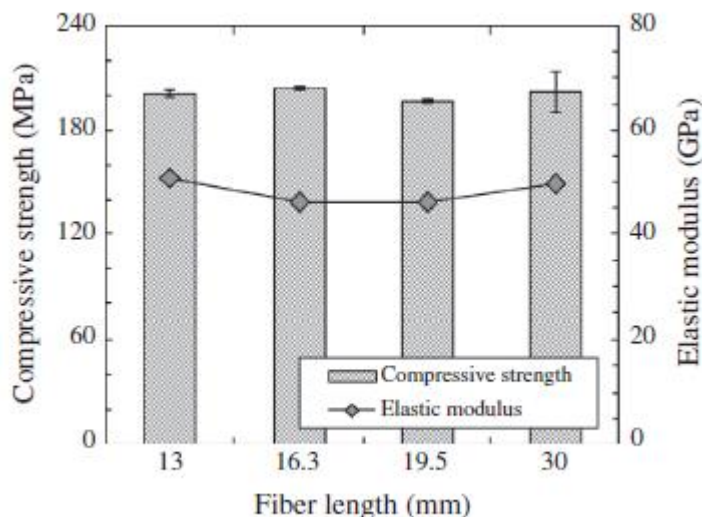


Figura 23- Valores obtidos à compressão e módulo de elasticidade para os diferentes tipos de fibras Yoo, et al, (2014).

Quanto ao comportamento à flexão aqui já houve diferenças de comportamento dependendo do tipo de fibras e do método de betonagem. A rigidez inicial foi pouco afectada pelo comprimento das fibras. A carga de pico à flexão foi superior nas fibras com comprimento de 19.5mm, devido a uma maior ligação efectiva entre a área da fibra e a matriz em zonas de fendas, por outro lado, as amostras com fibras de comprimento 30mm tiveram uma carga de pico inferior pois foi difícil conseguir uma dispersão uniforme das fibras na matriz, havendo alguma segregação. Com isto as fibras de 30mm exibiram bastante detioração nas *performances* de flexão e resistência mostrando grandes desvios em relação as outras. Existe também uma menor ductilidade e maior carga de pico no caso do método de colocação no centro da amostra do que na do canto.

Após esta análise, o autor faz também uma análise de imagem. Esta análise de imagens foi feita no centro da peça para investigar o comportamento das fibras na zona principal de tração. Para todas as amostras, notou devido ao efeito parede que as fibras próximas da parede tendem a ser mais alinhadas na direcção do fluxo. Reparou também que as fibras do betão colocado no centro ficaram mais dispersas que as do betão colocado no canto.

Este autor indica ainda uma equação que permite avaliar a dispersão quantitativa pelo cálculo do coeficiente de dispersão de fibras ( $\alpha_f$ ), expressa pela seguinte equação:

Equação 1

$$\alpha_f = \exp \left[ -\sqrt{\frac{\sum (x_i - 1)^2}{n}} \right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde “n” é o número total de fibras da imagem e o “ $x_i$ ” é o número de fibras na unidade, que é uma secção quadrada atribuída à fibra com o pressuposto que a dispersão das



fibras é homogénea. Se  $\alpha_f=1$  indica que é homogénea a dispersão das fibras, e se  $\alpha_f=0$  é tendenciosa a dispersão.

Pode-se ainda calcular o número de fibras por unidade de área ( $F_n$ ), dividindo o número total de fibras detectadas na imagem pela área da imagem, através da seguinte equação:

$$F_n = \frac{n_f}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde “ $n_f$ ” é o número total de fibras e “ $A$ ” é a área da imagem.

Note-se também que o coeficiente de dispersão de fibras diminui com o aumento do comprimento das fibras e o coeficiente de dispersão das fibras é menor na amostra de betão colocado no canto do que no centro, concluindo-se assim que pode ser melhorado se se utilizar fibras mais curtas. Além disso, foram localizadas mais fibras no centro para as amostras colocadas com o método no centro do que no canto, o que é devido a uma densidade relativamente elevada das fibras em relação a viscosidade da matriz.

### 3.3.1.2. Método de Su-Tae Kang e Jin Keun Kim

Este segundo estudo tem o objectivo de estudar o efeito da orientação das fibras à tracção analiticamente. Assim, foram realizados ensaios aos provetes que vão fornecer uma comparação para a verificação analítica Yoo, et al, (2014).

A proporção usada na mistura de água/cimento é de 0,20 ( $w/b= 0,20$ ), com agregados de areia de tamanho inferior a 0.5mm sendo excluídos agregados superiores. Foi introduzida uma quantidade de superplastificante necessária para garantir a operacionalidade com uma baixa proporção de água/cimento. Foi também usado um material de enchimento para aumentar a densidade do UHPFRC com tamanho médio de grão na ordem dos 4mm. Por último mas não menos importante, foi adicionado 2% de volume de fibras com comprimento de 13milímetros e 0,2mm de diâmetro.

A fim de se estudar a orientação das fibras à tracção, foram usados dois métodos de betonagem: colocação do betão paralelo à direcção da tensão de tracção e colocação do betão na direcção transversal à tensão de tracção.

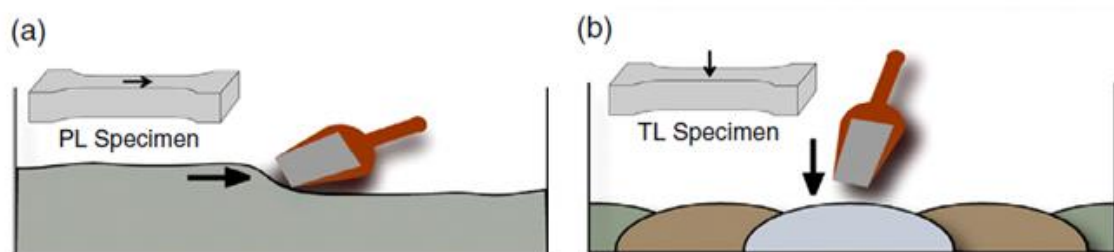


Figura 23 - Dois métodos de betonagem utilizados: (a) direção paralela; (b) direção transversal Yoo, et al, (2014).

As amostras para o ensaio de tração têm forma de osso de cão. Foram traccionadas directamente com uma máquina de ensaios universal com uma capacidade de 250kN e uma capacidade de carregamento de 0.2mm/min. Na peça foram colocados dois medidores para que durante o ensaio se medisse a abertura da fenda.

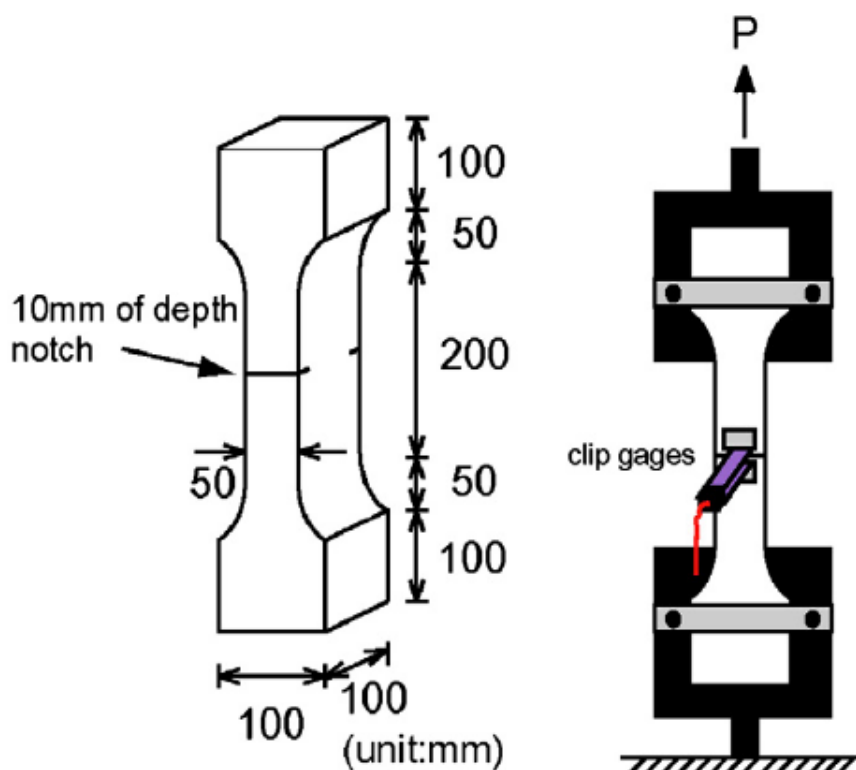


Figura 24 - Exemplo de provete que vai ser ensaiado e respectiva máquina de ensaios à tração Yoo, et al, (2014).

Após a realização do ensaio a média de tensão tracção da primeira fenda foi de 10.93MPa para as amostras com colocação paralela à direcção de tracção e 9.96MPa para as amostras com colocação transversal a direcção de tracção.

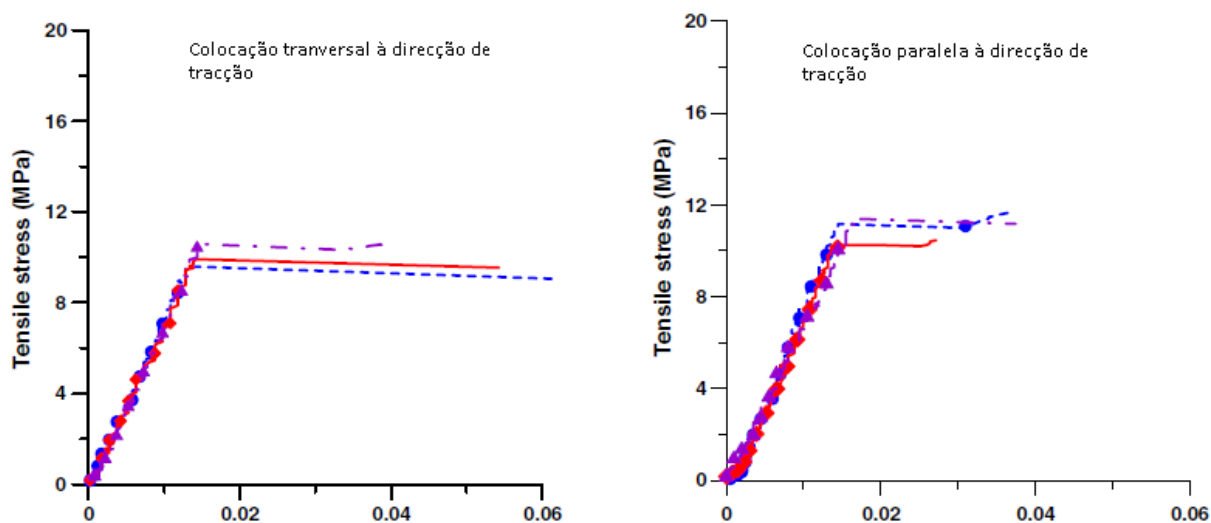


Figura 25 - Diagramas da tensão de tracção para a ocorrência da primeira fenda na direcção transversal e paralela de betonagem Yoo, et al, (2014).

Quanto à tensão média máxima de tracção de cada provete foi de 16.05MPa nas amostras colocadas na direcção paralela e 11.80MPa nas amostras colocadas na direcção transversal.

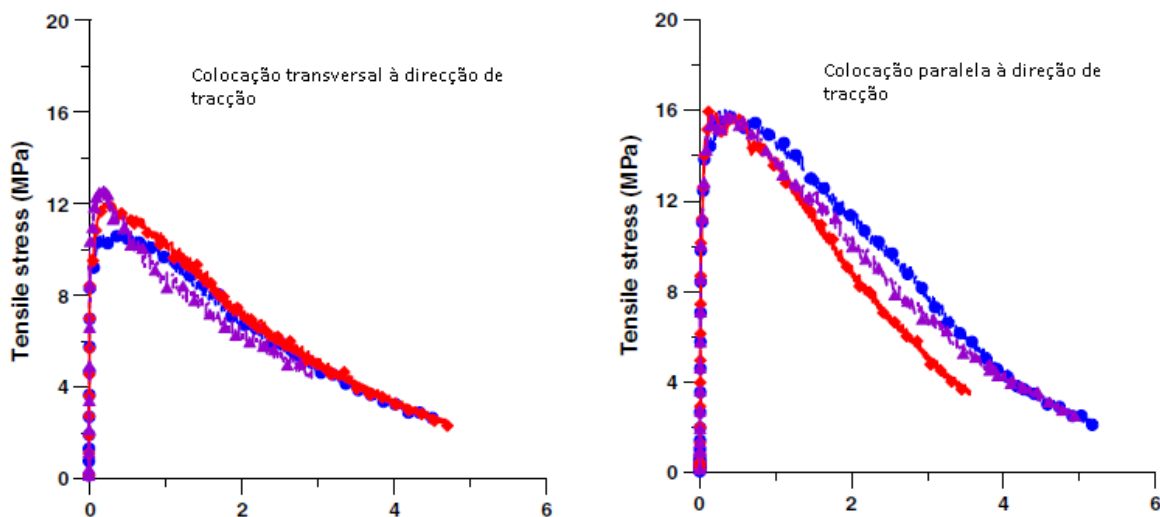


Figura 26 - Diagrama de tensão de tracção máxima na direcção transversal e paralela de betonagem Yoo, et al, (2014).

Segundo os resultados apresentados foi possível verificar uma diferença nas tensões de tracções consoante o método de betonagem. Entre os dois casos as amostras de colocação paralela a direcção de tracção apresentam um melhor desempenho do que os colocados transversalmente. É também visível que a diferença de tensões no primeiro caso, que é a ocorrência da primeira zona de fendilhação, tem uma diferença menor em relação ao segundo caso, tensão máxima de tracção resistida. No primeiro caso as diferenças de tensões da colocação paralela são mais elevadas, na ordem dos 10%, que a colocação transversal, ou seja, uma pequena diferença não muito significativa. No segundo caso a diferença já é bastante considerável, superando novamente a colocação paralela em cerca de 40% superior à transversal.

O autor continua agora com uma análise de imagem tal como o primeiro método/estudo aqui apresentado. Neste processamento de imagens, verificou que a distribuição de fibras apresentada é mais uniformemente dispersa no caso das amostras betonadas paralelamente. Além disso, a maioria das fibras das amostras de colocação paralela são alinhadas mais de modo paralelo com a direcção normal do plano de corte do que as colocadas transversalmente.

### 3.3.1.3. Método de L. Ferrara, M. Di Prisco e M. Lamperti

O último método/estudo que passamos a mostrar foi desenvolvido por L. Ferrara, M. Di Prisco e M. Lamperti e também analisa o comportamento da tensão de fendilhação com o papel da orientação das fibras induzidas pelo fluxo Ferrara, et al, (2010).

O elemento estrutural deste trabalho é um elemento pré-fabricado em que as fibras vão surgir como único reforço, à semelhança dos anteriores. Tem as dimensões de 1m x 0.5m e uma espessura de 30mm. As fibras que vão reforçar o betão de elevado desempenho são de aço, com um comprimento de 13mm e um diâmetro de 0.16mm, e representam um total de 1Kg/m<sup>3</sup>. A mistura desta investigação tem a seguinte composição:

Constituent	quantity
	kg/m <sup>3</sup>
Cement type I 52.5	600
Slag	500
Sand 0-2 mm	982
Water	200
Polycarboxilate SP	33 (lt/m <sup>3</sup> )
Steel fibers ( $l_f/d_f = 13/0.16$ )	100

Figura 27 - Composição da amostra utilizada Ferrara, et al, (2010)

Para avaliar a orientação das fibras, foram propostos dois métodos de betonagem: no primeiro caso o betão foi despejado a partir do lado mais curto, no segundo caso o betão foi despejado na borda do centro do lado maior.

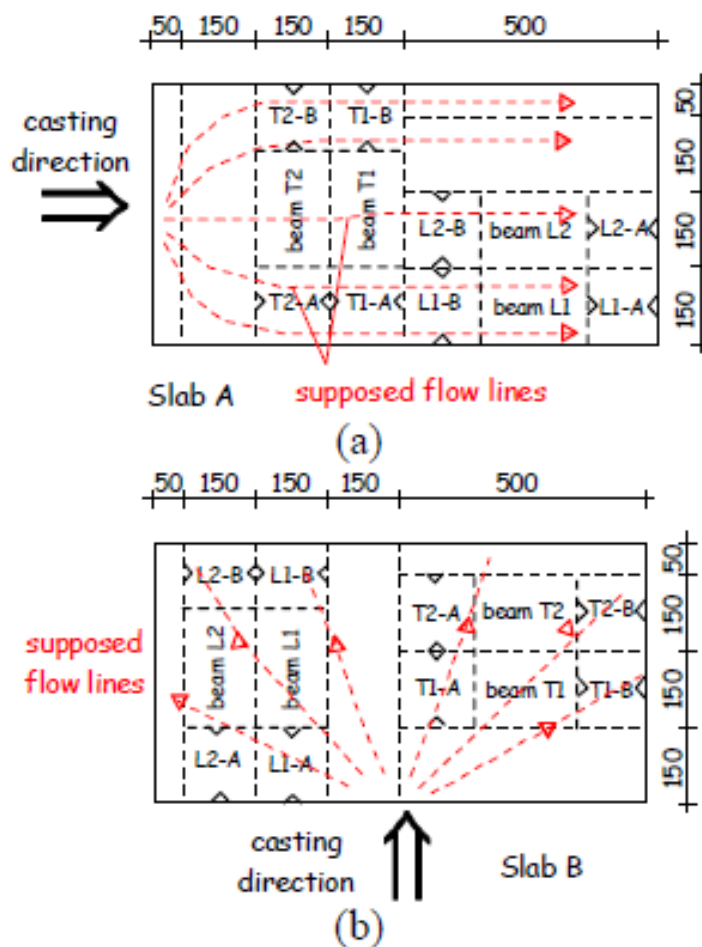


Figura 28- Ilustração dos fluxos teóricos possíveis de serem adoptados quando for feita a betonagem Ferrara, et al, (2010)

Como se pode verificar na ilustração acima, no caso “(a)” o fluxo tende a seguir um alinhamento na direcção das tensões de tracção principais, já no caso “(b)” verifica-se um fluxo radial que certamente será mais difícil de avaliar.

Após betonagem e endurecimento do material foram cortadas em vigas com 150mm de largura e 500mm de comprimento para que possam ser ensaiadas. Segundo a ilustração acima, no caso (a) torna-se evidente a direcção das tensões principais devido à flexão aplicada, sendo que nas vigas rotuladas com o “L” são paralelas as tensões e nas vigas rotuladas com “T” são perpendiculares, isto para o sentido de fluxo teórico que se acredita que tenham alinhado as fibras. No caso (b) este tipo de análise da direcção das tensões já não é possível ser feito devido ao provável fluxo radial que foi gerado.

O próximo passo foi proceder aos ensaios que foram realizados pelo DEWST onde as amostras foram submetidas a um esforço e foi medida a abertura de fendas da amostra bem como retirados os valores máximos de carga para a primeira abertura de fendas como para a tensão de pico.

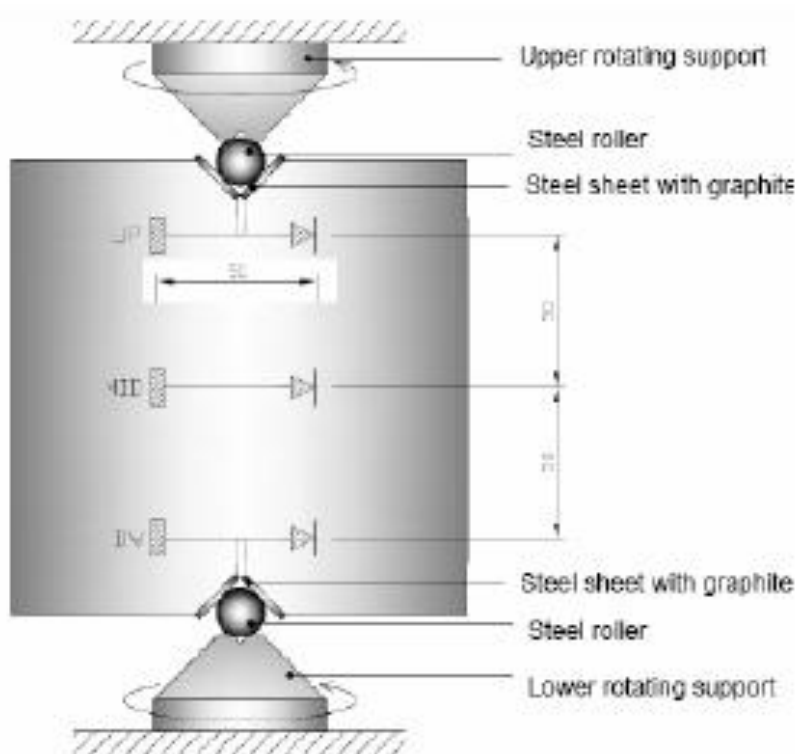


Figura 29 Esquema do ensaio do DEWST Ferrara, et al, (2010).

Após os ensaios obteve-se uma maior discrepância de valores no modelo de orientação por fluxo ao longo da placa do que pelo fluxo radial. Segundo os resultados obtidos o modelo de betonagem pelo menor lado foi onde se obteve o maior valor de tensão de pico (máxima) com o valor de 27.6MPa.

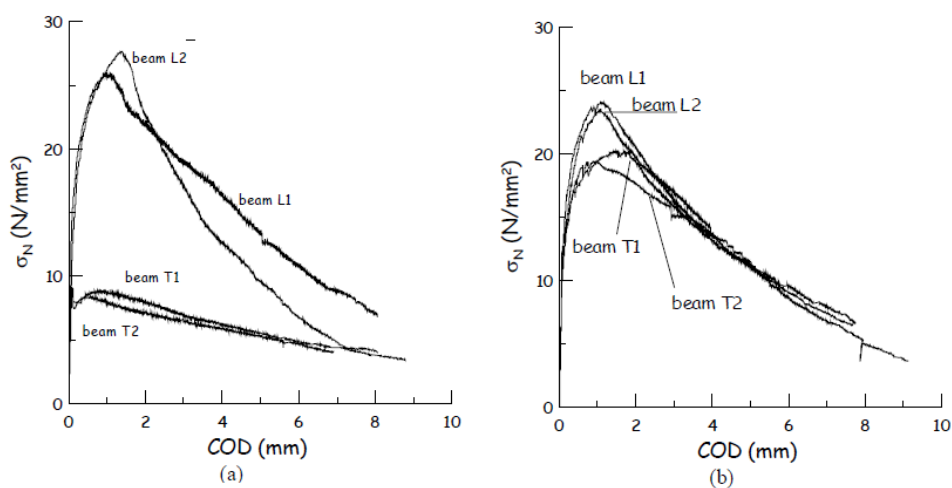


Figura 30 Resultados das tensões de pico obtidas nos ensaios do DEWST para os diferentes tipos de betonagem: (a) betonagem na direcção das tensões; (b) betonagem radial Ferrara, et al, (2010)

Tabela 1 resultados obtidos dos ensaios do DEWST para os dois tipos de betonagem

Amostra A	Tensão de pico (Mpa)	Amostra B	Tensão de pico (Mpa)
L1	26.0	L1	24.1
L2	27.6	L2	23.5
T1	9.2	T1	20.3
T2	8.9	T2	19.4

Percebe-se pelos gráficos, as tensões de pico foram obtidas para pequenas deformações, na ordem máxima do 2mm. Percebe-se também que a placa betonada com fluxo radial, gráfico (b) obteve os valores mais constantes nos dois tipos de direcções de “vigas” estudadas não havendo nenhuma direcção favorável. Já no processo de betonagem pelo menor lado, existe uma grande discrepância de valores, percebendo-se bem que a orientação das fibras funcionou na íntegra para as “vigas” orientadas na direcção do fluxo, “vigas” L1 e L2, já as transversais denominadas por “T1” e “T2”, obtiveram os menores valores.

### 3.4. Orientação Magnética

Este capítulo ainda se encontra muito prematuro de aplicação, pois encontra-se pouco desenvolvido este modelo. Um dos factores para o seu fraco desenvolvimento é um maior grau de dificuldade no seu estudo, necessário o desenvolvimento de um campo magnético. Outro factor, não menos importante, é que este modelo exige um maior custo de aplicação, pois é necessária uma presença de corrente eléctrica na maioria dos casos.

A orientação magnética surge nos compósitos apenas reforçados com fibras de aço, isto porque estas exibem características ferromagnéticas que permitem a orientação das fibras através da criação de um campo de forças magnético, deste modo é possível obter uma orientação das fibras.

Este tipo de casos de aplicação magnética surge de igual modo como o fluxo, com as mesmas composições da matriz, com características de boa viscosidade, de execução enquanto fresco e também exigente novamente nas “boas” características das fibras. Deste modo, torna-se eficaz quando se conhece a zona de acção dos esforços de tração para se obter a orientação desejada das fibras.

Por outro lado, este método encontra-se limitado à aplicação em elementos de lâmina, pois, como é fácil de compreender, ao criar-se um campo de forças magnético em determinado molde este só consegue ser eficaz se for um elemento relativamente esbelto e curto e compreendido na direcção do campo magnético, pois caso contrário seria necessário criar um campo de forças muito grande que traria outro tipo de eventualidades na execução. Encontra-se também limitado na sua aplicação exterior, este tipo de orientação exige a criação de um modelo não exposto a condições externas, ou seja, a sua execução em ambiente fechado para poder criar um bom campo magnético.

### 3.4.1. ALGUNS MÉTODOS DE ORIENTAÇÃO MAGNÉTICA

Apesar de o objecto de estudo estar ainda pouco investigado, ainda assim foi possível aceder a determinados estudos que nos mostram a sua aplicação.

#### 3.4.1.1 Método de Björn Svedberg

Este método aqui apresentando, desenvolvido por Björn Svedberg em Estocolmo-Suécia, é utilizado para alinhar unidimensionalmente as fibras de aço em elementos de laje através de um campo magnético vindo de um protótipo Svedberg, (1999). O betão entra no seu estado fluido no protótipo e é conduzido ao longo deste de uma extremidade a outra a fim de se aplicar uma força temporária de alinhamento das fibras na direcção pretendida. Para facilitar este alinhamento das fibras existe uma componente vibratória durante o movimento do campo magnético.

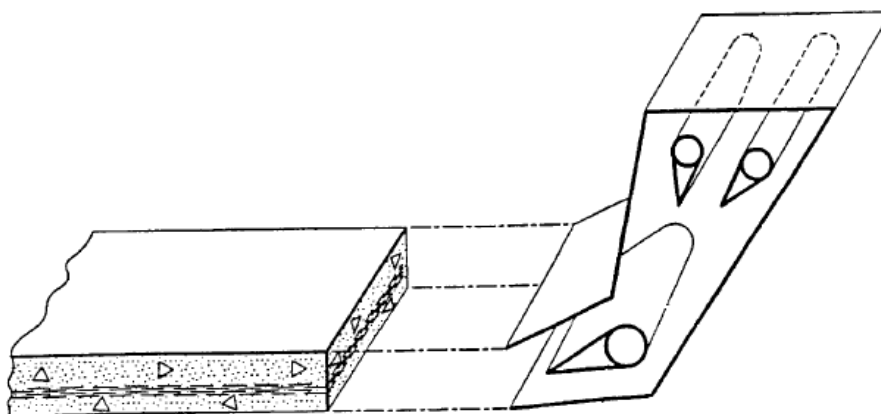


Figura 31 - Corte em 3D representativo da máquina de magnetismo Svedberg, (1999).

O campo magnético é aplicado por meio de um dispositivo magnético que se encontra no interior da máquina e o betão ao atravessá-lo vai orientar as fibras. No modelo aqui apresentado, o alinhamento magnético de fibras magnetizáveis dispersas no betão é realizado por uma componente de alinhamento de fibras tendo inicialmente uma parede não magnética. Durante o movimento relativo, as fibras na vizinhança da primeira parte do muro não magnético são magneticamente atraídas para a primeira parte. No entanto, eles são pré-ventilados para que entrem em contacto com o dispositivo magnético pela parede não magnética, que forma uma barreira de tela ou que separa o dispositivo magnético do material viscoso no qual as fibras estão dispersas.



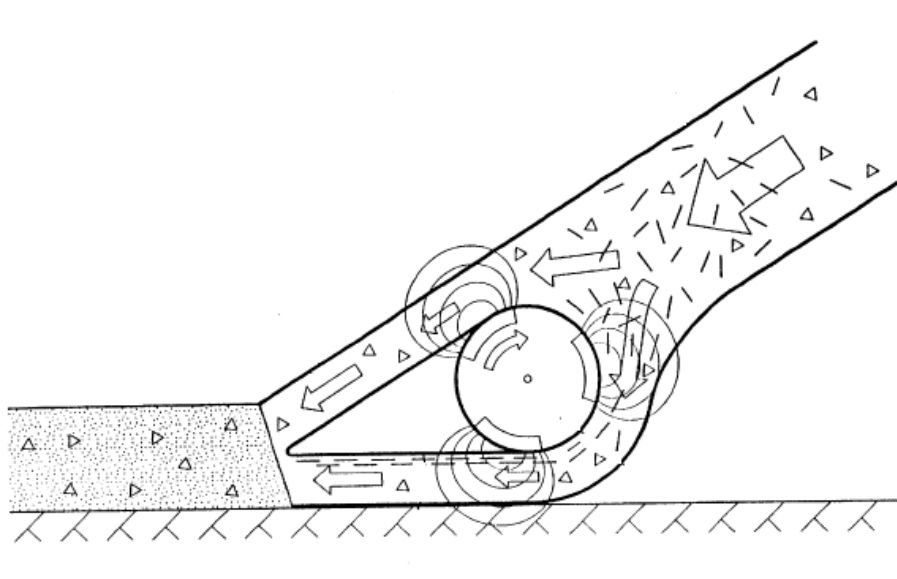


Figura 32 - Pormenor do funcionamento do dispositivo magnético de orientação das fibras Svedberg, (1999).

Por conseguinte, o dispositivo magnético atrai as fibras alinhando-as e tende a puxá-las ao longo da direcção do seu movimento em relação ao betão fluido. Devido à sua viscosidade, o betão evita que as fibras se movam muito rapidamente aderindo a elas. Uma vez que a força magnética tem uma componente na direcção do momento relativo o elemento do alinhamento das fibras e do corpo viscoso, tende a alinhar as fibras nessa direcção que se move para eles. De preferência, o betão de elevado desempenho é vibrado adjacente ao elemento das fibras, de modo a que o seu alinhamento seja facilitado.

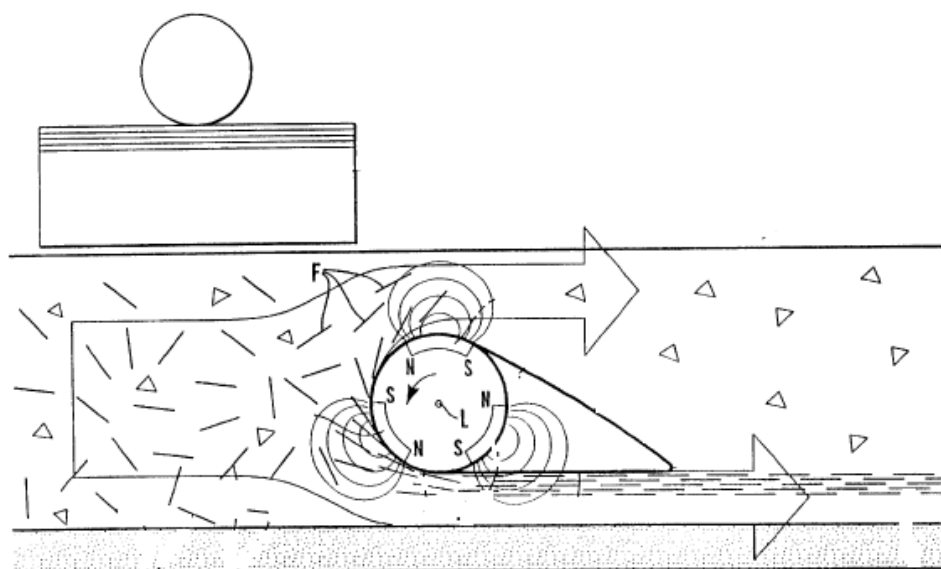


Figura 33 - Pormenor do funcionamento do dispositivo magnético com referência à posição final das fibras todas na mesma direcção Svedberg, (1999).

O alinhamento das fibras magnéticas neste modelo é impraticável em muitos casos, no entanto em grandes lajes ou pavimentos são fáceis de aplicar.

#### 3.4.1.2. Método de Ivar Miller

Este segundo método desenvolvido em Estocolmo na Suécia desenvolvido por Arvo Ivar Miller, permite também obter a direcção pretendida das fibras sob influência da presença de um campo magnético para orientar as fibras ao longo das linhas de força desse campo Miller, et al, (1975). Este modelo também tem uma componente vibratória que é controlada por um “rectificador pulsátil de onda”, que controla o comprimento dos pulsos de forma variada e em diferentes tempos de actuação do campo magnético. Naturalmente as fibras vão ser obrigadas a vibrar devido a alimentação alternada a corrente magnética da bobina. Na prática a intensidade do campo magnético é medida em ampere por unidade de comprimento.

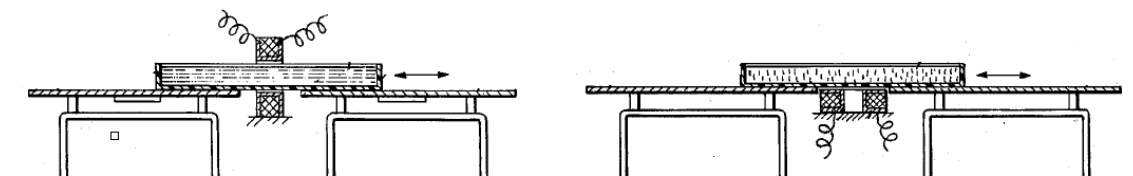


Figura 34 - Perfis longitudinais do electroíman com as duas possibilidades de orientação de fibras: à esquerda orientação horizontal; à direita orientação vertical campo Miller, et al, (1975).

O campo magnético criado é baixo para colocar os polos a uma frequência apropriada dependente do comprimento e massa das fibras para que a orientação ou movimento das fibras pode ser feito por electroímãs ou ímanes de forma permanentes.

A bobina é enrolada por fio de cobre, que gerar linhas de força para cooperarem umas com as outras ao longo dos lados da bobina criando assim um campo magnético global. O resultado vai ser um grupo de linhas de força a entrar e sair pelo ar representado da mesma maneira um campo de forças de um íman. A força deste campo magnético será proporcional à corrente fornecida e à densidade da bobina. A orientação das fibras pode ser influenciada por meio da rotação das bobinas e assimetria do modelo.

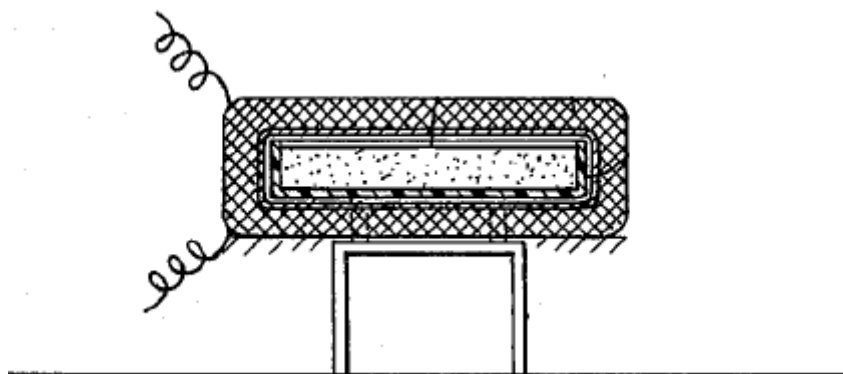


Figura 35 - Corte transversal no electroíman Miller, et al, (1975).

As fibras podem ser misturadas no betão ou adicionadas posteriormente a betonagem no molde, sendo que as fibras são movidas desde a superfície do betão para dentro através do campo magnético e da vibração, impedindo assim exposição exterior logo evitando a possível corrosão.

Ainda segundo o autor, em princípio a bobina magnética pode ser enrolada em diferentes dimensões e assim as dimensões do provete também são opcionais, no entanto até à data foi testado com sucesso em provetes até 40mm de espessura. O tempo de orientação magnética é de 15 segundos com um amostra de 36cm de comprimento sendo passada para trás e para a frente da bobina 6 vezes de modo a criar a vibração pretendida.

Vários testes foram feitos com diferentes dimensões de fibras e espessuras de amostras com e sem orientação das fibras e os valores de resistência à flexão e resistência ao impacto foram medidos e compilados na seguinte tabela:

Tabela 2 Resistência à flexão e resistência ao impacto para os dois tipos de fibras com ou sem alinhamento magnético Miller, et al, (1975).

Fibre type Length/ diameter	Thick- ness of the sample	Flexural strength MN/m <sup>2</sup>		Impact strength KG/m <sup>2</sup>	
		Unaligned	Aligned	Unaligned	Aligned
25/0.38 mm	10 mm	9.1	25.7	11	19
"	20 mm	7.5	21.0	16	31
25/0.25 mm	10 mm	10.2	21.6	16	30

Pode-se verificar pelos resultados obtidos que a orientação das fibras surtiu efeito com as fibras de 25mm de comprimento de 0.38mm de diâmetro a atingir o maior valor de resistência na ordem do 25.7MPa quando alinhadas pelo campo magnético.



# 4

## Programa Experimental

### 4.1. Enquadramento

O objectivo deste capítulo é a realização de amostras de betão de elevado desempenho reforçado com fibras para estudar o efeito da orientação das fibras no comportamento à flexão e correlacionar os dados obtidos nos ensaios com as análises de imagem.

Ao todo foram realizados 6 amostras. Essas amostras vão estar sujeitas a diferentes tipos de orientação, como a orientação magnética em dois sentidos diferentes e sem orientação. Para cada um dos tipos de orientação são usadas 2 amostras. Após isso, será feito ensaio mecânico para observar o comportamento à flexão, tanto a nível de tensões como de abertura de fendas. De seguida será feita análise de imagem nos provetes ensaiados para se poder ver se as orientações das fibras foram as pretendidas, tirando assim as conclusões dos resultados obtidos. A análise de imagem vai correlacionar os dados obtidos nos ensaios mecânicos.

#### 4.1.1. ENSAIO UTILIZADO

O ensaio mecânico realizado foi através do DEWST (Double-Edge Wedge Splitting Test). Como foi referido ao longo do relatório o UHPFRC contem dois fatores que o diferem dos restantes betões: a aplicação de fibras metálicas e a sua composição de elevado desempenho. Deste modo, o DEWST foi desenvolvido em especial para avaliar o comportamento pós-fendilhação do UHPFRC.

Este ensaio consiste na aplicação de forças de compressão simétricas através da utilização de dois entalhes. É um ensaio simples em que, como se pode observar na figura, é aplicada uma força de compressão  $P$  que é convertida numa força de tração  $T$ , que atua na secção central do provete. A relação entre estas duas forças é obtida pela seguinte equação:

$$T = P \frac{\cos \theta - \mu \sin \theta}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \quad \text{Equação 3}$$

sendo que  $\theta$  corresponde ao valor da inclinação do entalhe ( $45^\circ$ ) e  $\mu$  ao coeficiente de atrito entre as placas, que neste caso foi 0.06 uma vez que se utilizou aço lubrificado com grafite.

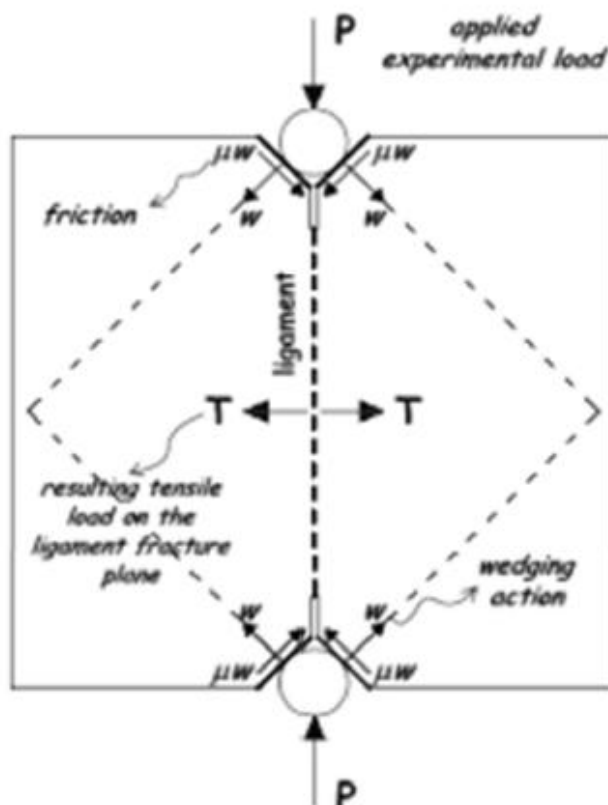


Figura 36- Esquema de forças do ensaio DEWST Ribeiro, (2013).

Este ensaio permite retirar os valores da tensão de pico (máxima) de tracção que o provete atinge com a respectiva abertura de fendas bem como a tensão de pré-fissuração, que é para o valor da tensão para a primeira abertura de fendas.

#### 4.1.2. MÉTODO DE ORIENTAÇÃO

O método utilizado neste estudo de orientação magnética foi desenvolvido por Filipe Ribeiro (Ribeiro, 2013). Este método consiste na construção de um electroímã à semelhança do exemplo exposto anteriormente desenvolvido por Arvo Ivar Miller Miller, (1975).

Atualmente sabe-se que todos os ímanes são conhecidos por ter dois polos, norte e sul, que se repelem mutuamente. O íman está envolvido em linhas magnéticas criando um campo magnético, mas tal também é possível ser feito através do movimento de electrões (corrente eléctrica). Deste modo enrolou-se fio de cobre para fazer duas bobinas, sendo que o campo magnético de cada espira da bobina vai interagir com as vizinhas formando-se um campo de forças combinado.

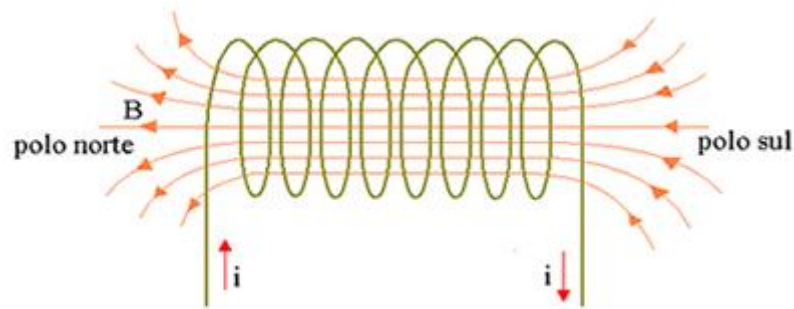


Figura 37 - Exemplo de uma bobine com o respetivo campo magnético (Domiciano Marques)

O módulo, isto é, a intensidade do campo magnético no interior de uma bobine, é obtido através da seguinte equação, onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio no interior da bobine, e  $N/L$  é representa o número de espiras por unidade de comprimento da bobine.

:

$$B = \mu \cdot \frac{N}{L} \cdot i \quad \text{Equação 4}$$

No entanto, para que a bobina tenha a mesma intensidade que um íman é necessário inserir no seu interior um núcleo de ferro para que a intensidade do campo magnético possa aumentar consideravelmente, pois o átomo de ferro possui bastantes electrões, passando agora ser denominada de electroíman. A energia fornecida a este electroíman provém de uma bateria de 12V que estabelece o alinhamento dos electrões em redor do condutor originando assim um campo magnético alinhado. A presença do reóstato é para controlar a intensidade da corrente fornecida pela bateria que é medida através de um voltímetro.

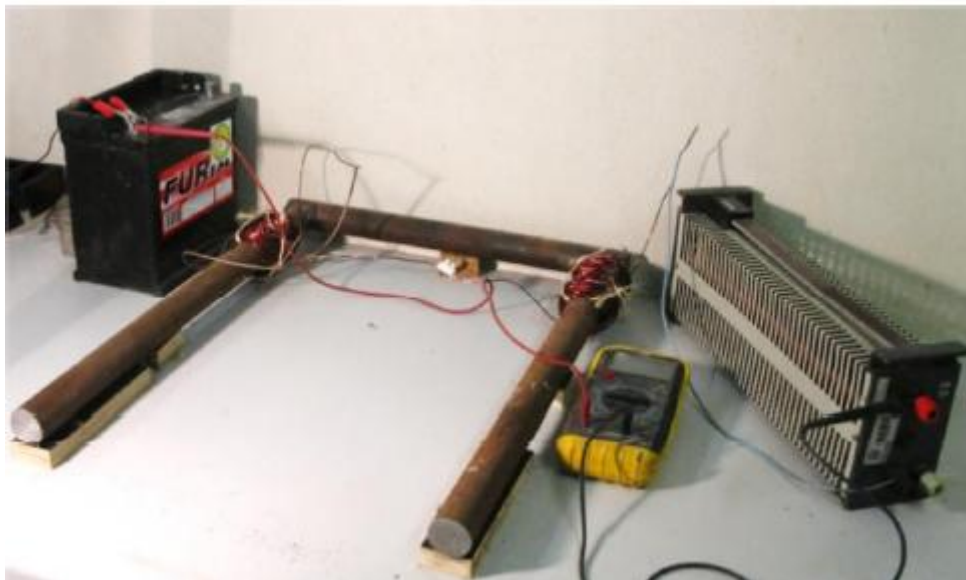


Figura 38 - Electroíman em "U" Ribeiro, (2013).

Na figura acima pode-se ver que as bobinas foram enroladas de maneira que o campo magnético gerado seja nas pernas do “U”. Assim, a zona de betonagem será entre as pernas do

“U” que é onde tem um campo magnético uniforme capaz alinhar as fibras segundo as linhas do campo magnético. O diâmetro do núcleo de ferro é de 0.037m, o comprimento das pernas é de 0.58m e a zona central tem um comprimento de 0.42m, sendo que as bobinas tem um comprimento de sensivelmente 0.10m. Importante referir, tal como nos modelos atrás apresentados de orientação magnética, que este campo tem um efeito tridimensional, ou seja, as fibras além de serem orientadas contrariam a acção da gravidade, evitando ficar na face exterior ou aglomeradas em baixo.

Para a orientação das fibras o molde foi colocado em duas direcções sob acção do campo magnético: uma na direcção longitudinal para que assumissem a orientação a  $0^\circ$  e outra na direcção transversal para que a orientação fosse  $90^\circ$ .

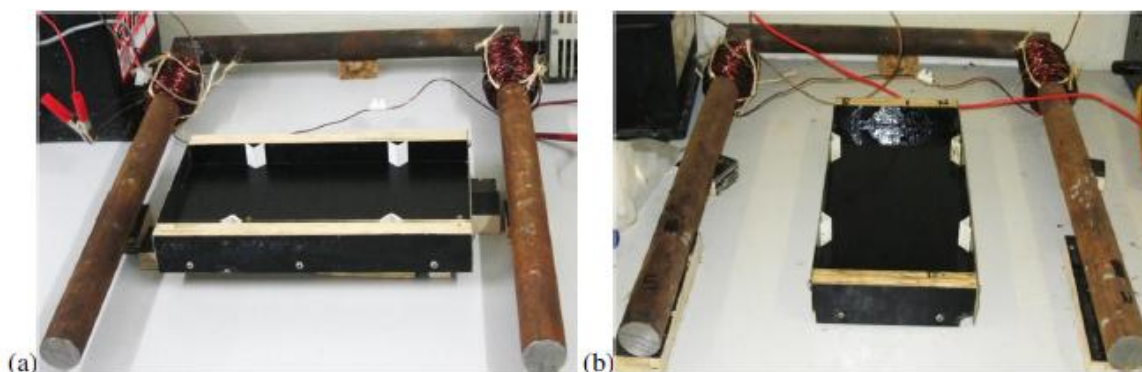


Figura 39 - Dois tipos de orientação do molde: para as fibras a  $0^\circ$  o molde (a); para as fibras a  $90^\circ$  o molde (b)

O molde tem uma espessura de 25mm e as dimensões indicadas na imagem seguinte. Existe uns entalhes em plástico no molde de formato triangular para que depois seja possível a realização do ensaio DEWST, sendo cada placa dividida a meio para fazer a respectivo ensaio mecânico.



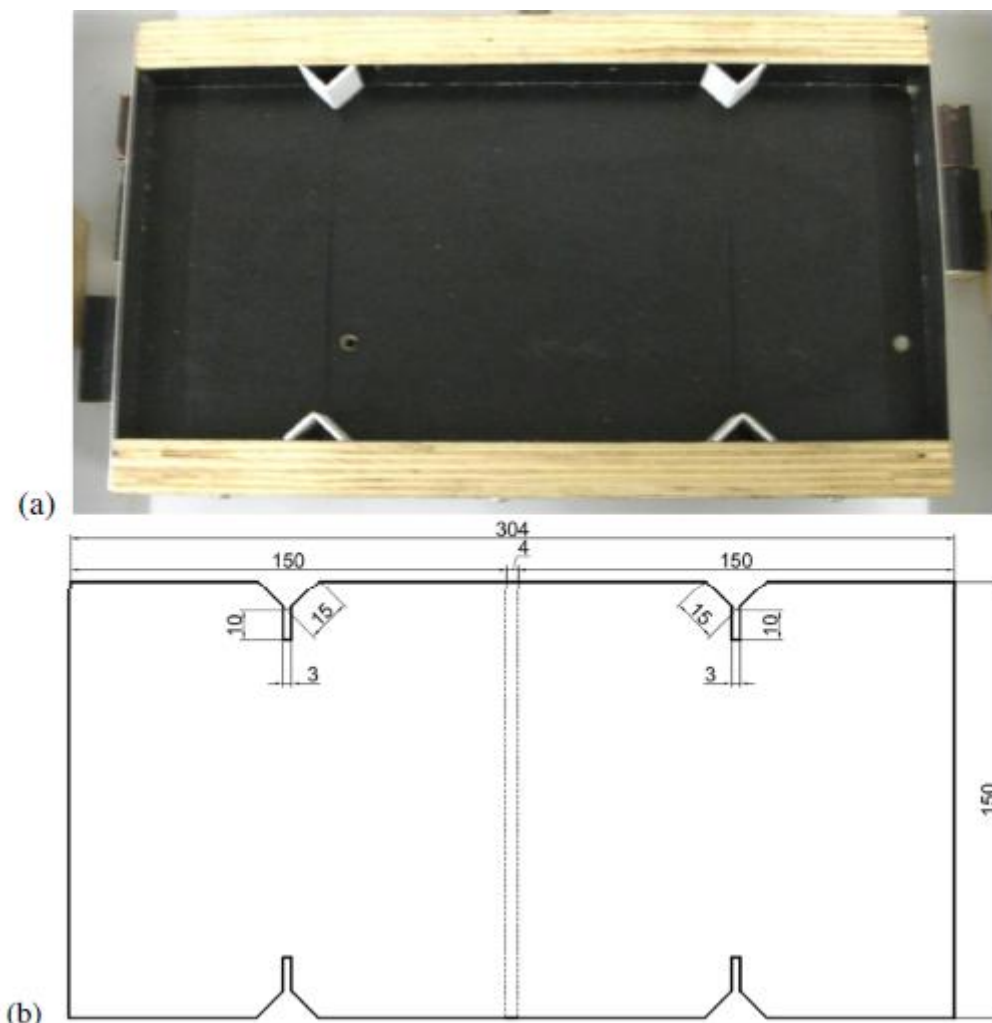


Figura 40 - Molde utilizado para a betonagem (a); dimensões da placa que vai ser ensaiada (b)

#### 4.1.3. RECOLHA E TRATAMENTO DE IMAGEM

A análise de imagem para caracterizar as fibras metálicas obtidas através da utilização do microscópio ótico tem especial interesse para a correlação que irá ser feita a seguir.

O microscópio já é utilizado na análise e investigação de diversos materiais de construção, entre os quais os betões e as argamassas. A petrografia que é um ramo da geologia que se dedica à descrição e análise das características estruturais, mineralógicas e químicas das rochas, e utiliza o microscópio como ferramenta preponderante. Este permite a observação do tipo de agregado, cor da matriz de cimento, padrões de macro fissuração, etc.

Para que se faça uma boa recolha de imagem através no microscópio é necessário que a amostra esteja em condições satisfatórias, isto é, seja de superfície polida, sem riscos, fracturas, cavidades e poros para que possa ser feita uma boa análise.

A preparação das amostras é um processo que tem diferentes etapas: o corte com determinado tipo de serra específico dependendo do material, o desbaste da amostra com disco de desgaste em rotações controladas, acabamento e polimento. Este é um processo minucioso

bastante difícil para que se consiga a perfeita visualização das fibras na amostra, visto que estas têm um diâmetro na ordem dos 0.175mm.

O microscópio utilizado para recolha de imagem foi a Nikon Multizoom AZ100, disponibilizado pelo LABEST (Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural). É um equipamento versátil que permite observação por luz transmitida ou reflectida, ajustes na ampliação, zoom, iluminação, fluorescência, etc.

Neste caso de estudo foi utilizada a luz reflectida, com a objectiva AZ-Plan Apo 1x (NA: 0.1/WD:35mm) com um zoom de 3x.



Figura 41 - Instalações do LABEST, Microscópio Multizoom AZ100 e respectivo computador Ribeiro, (2013)

Com as amostras polidas é então possível recolher a imagem da amostra. Cada amostra recolhe sensivelmente 100 imagens parciais da superfície polida. O processo de recolha das imagens é cuidadoso visto que tem que haver alguma sobreposição de imagens para que seja possível posteriormente fazer a junção. A junção de imagens é feita com ajuda do *software AutoStitch*, que as vai unir criando uma só imagem de toda a amostra.

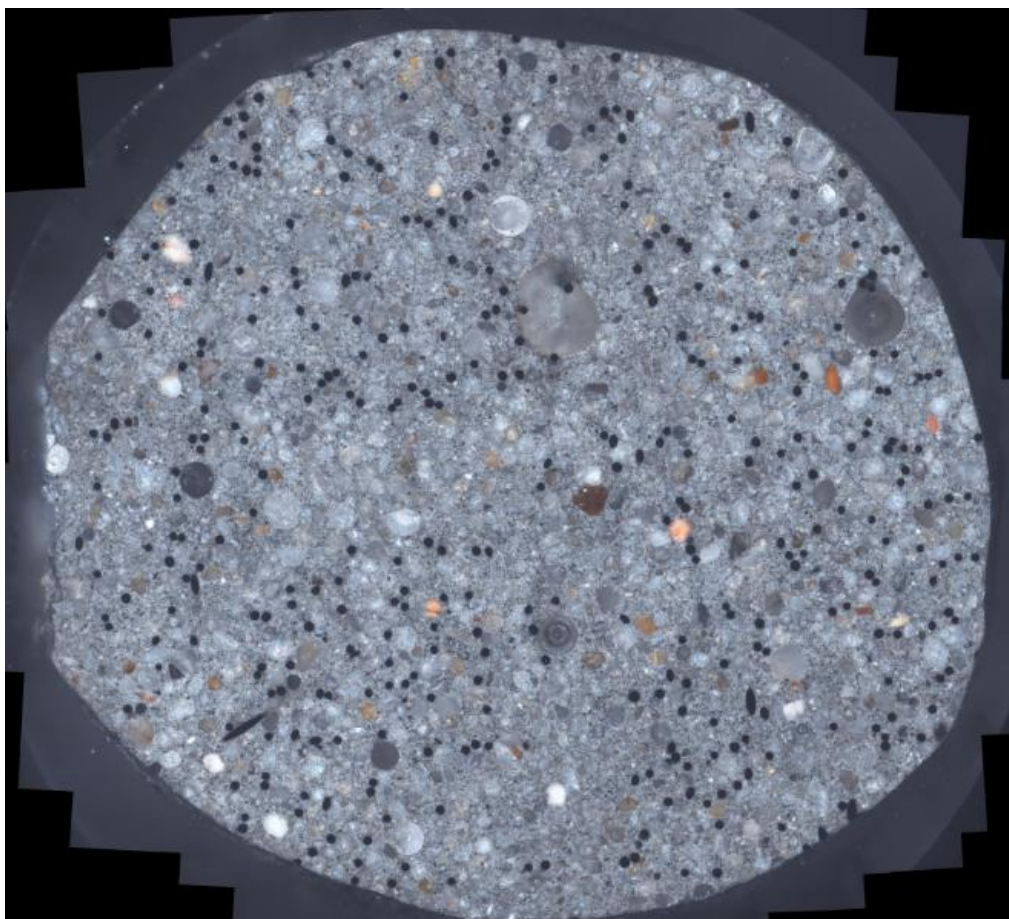


Figura 42 - Exemplo de uma amostra obtida após junção das imagens obtidas pelo microscópio Ribeiro, (2014)

Em relação ao tratamento de imagem, vai ser feita através de uma ferramenta informática que é o *Matlab*. O *Matlab* é um *software* com uma linguagem de programação própria que permite efectuar cálculos numéricos, ambiente com excelentes capacidades gráficas e pacotes de funções, designados de *toolboxes*, que permitem a aplicação de conceitos em determinada área científica a problemas de matemática, ciências e engenharia. Deste modo o *toolbox* é uma expansão do *Matlab* dedicada processamento de imagem com mais de 250 funções.

O algoritmo utilizado neste estudo foi desenvolvido por Filipe Ribeiro e permite a identificação das fibras presente nas amostras. Para identificação das fibras usou funções de segmentação e caracterização de regiões. A função de segmentação consiste na separação através do brilho enquanto a caracterização de regiões faz limitação pelas áreas, fronteiras e formas Ribeiro, (2013).

O algoritmo de identificação das fibras está subdividido em scripts: o primeiro para isolar cada uma das regiões que contem fibras, o segundo vai permitir a caracterização de cada uma das divisões criadas fornecendo uma imagem BMP por cada fibra com a respectiva fronteira identificada, elipse aproximada, raio máximo e mínimo e por último o terceiro script que é um ficheiro *Excel* com todos parâmetros: diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro equivalente, área.

Assim, o algoritmo em conjunto com as imagens obtidas vai permitir fazer uma avaliação estatística das amostras, como a inclinação das fibras, o número de fibras por unidade de área, entre outros parâmetros.

#### 4.2. Composição da amostra

A composição das amostras para os ensaios e tratamento de imagens foi feita de igual forma.

A composição das amostras realizadas é:

Tabela 3 Composição das amostras

Materiais constituintes		
Dosagem de fibras em volume		3.0%
Fibras DM 9/0.175 (kg/m <sup>3</sup> )	Krampeharex	117.75
Fibras DM 12/0.175 (kg/m <sup>3</sup> )	Krampeharex	117.75
cimento(kg/m <sup>3</sup> )	CEM I 42.5 R Outão	794.90
sílica fumo (kg/m <sup>3</sup> )	Centrilit Fume SX	79.49
fíler calcário (kg/m <sup>3</sup> )	BETOCARB P1 - OU	311.43
areia (kg/m <sup>3</sup> )		940.96
água (kg/m <sup>3</sup> )		153.76
superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	Viscocrete 20 HE	22.20

Como se pode ver pela tabela acima, a amostra tem um rácio de água/cimento na ordem dos 0.20. As fibras têm um comprimento de 9mm e um diâmetro de 0.175mm.

#### 4.3. Ensaio Mecânico

As placas obtidas dos métodos de orientação magnética e sem orientação foram ensaiadas aos 90 dias de idade. O nível de caracterização mecânica destes provetes de UHPFRC tem especial importância pois este ensaio foi desenvolvido com o propósito de caracterizar este tipo de material.

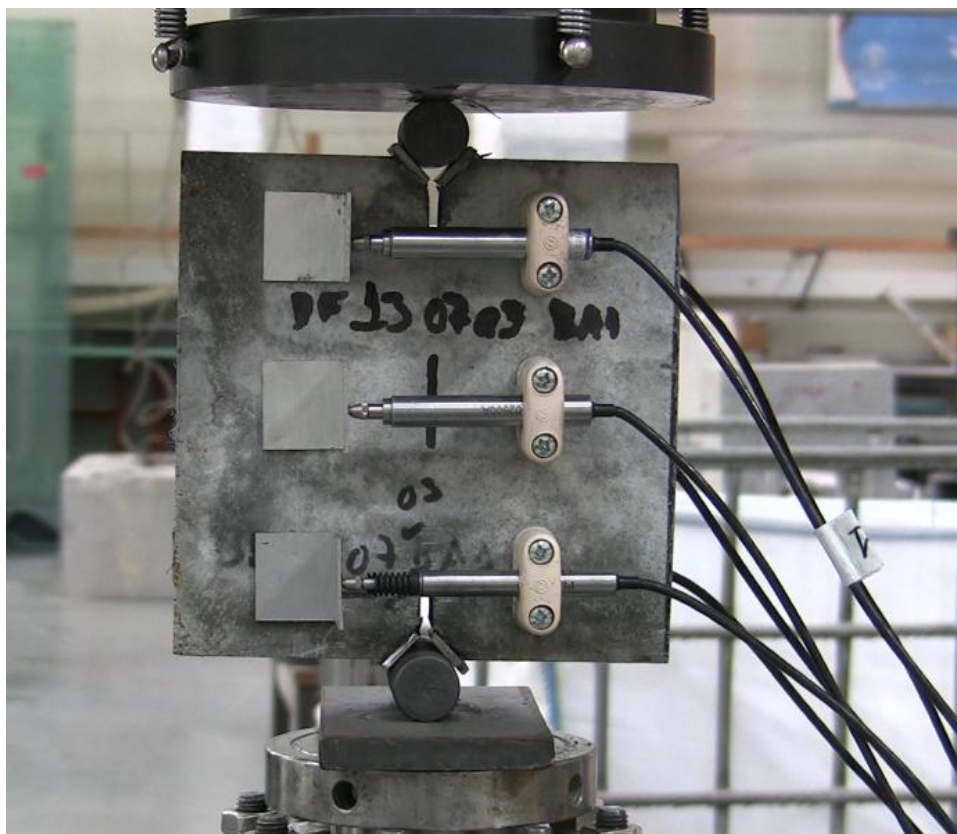


Figura 43 - Fotografia do ensaio DEWST

Na realização do processo de betonagem e respectiva orientação, as amostras foram devidamente identificadas para que não houvesse troca dos provetes. O quadro seguinte apresenta os resultados do ensaio DEWST com os valores da resistência de pico para cada um dos provetes ensaiados com uma dosagem de 3% de fibras e a composição referido no subcapítulo anterior:

Tabela 4 Tabela com os valores da resistência de pico, tensão média de pico e desvio de padrão

Orientação	Amostras	Tensão de Pico (MPa)	Tensão Média de Pico (Mpa)	Desvio de Padrão (%)
Sem orientação	A	7,16	7,18	0,3
	B	7,19		
Orientação 0°	C	16,41	16,44	0,3
	D	16,47		
Orientação 90°	E	3,18	3,43	10,1
	F	3,67		

Pela análise do quadro anterior é possível verificar que houve algumas discrepâncias nos valores obtidos para a tensão de pico.

Nota-se numa primeira análise que o maior valor obtido para resistência de pico foi 16.47MPa, que foi obtido pelo processo de orientação magnética a 0°. Significa isto que o



processo de orientação das fibras influencia significativamente a resposta do material quando tracionado. Apesar deste valor ser bastante superior aos restantes, não garante que o processo de orientação das fibras tenha sido totalmente eficaz, no entanto proporciona algumas garantias de uma boa funcionalidade do modelo.

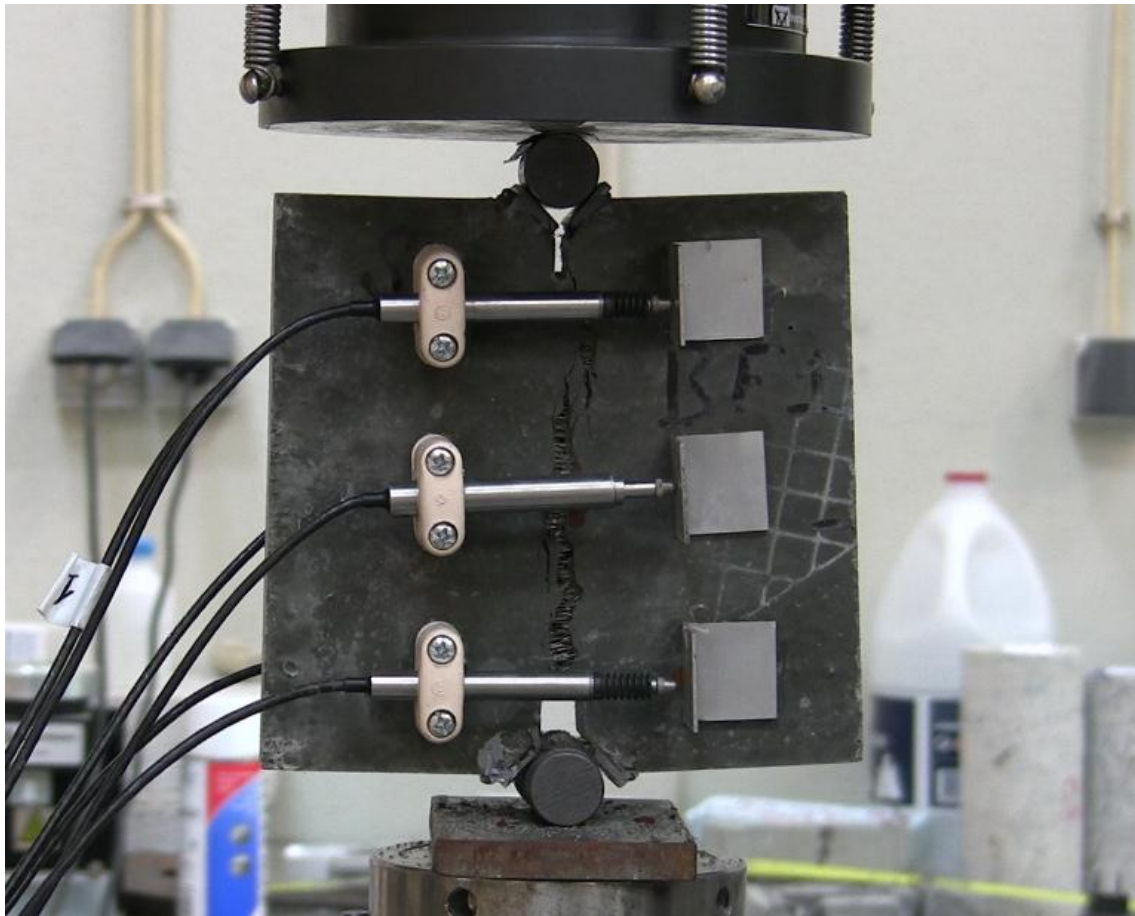


Figura 44 Provete que obteve o maior valor da tensão de pico no ensaiado, no DEWST.

Observando agora para as amostras orientadas a  $90^\circ$  encontrou-se os piores valores de resistência de pico. O valor máximo de resistência de pico é de 3.67MPa e a média é de 3.43MPa. Além disso, existe também o facto do desvio de padrão que ronda o 10%, sendo o maior dos três tipos de orientação. Pelos valores obtidos pode-se dizer que os resultados da orientação magnética a  $90^\circ$  foram satisfatórios, tanto a nível de resistência como de regularidade.

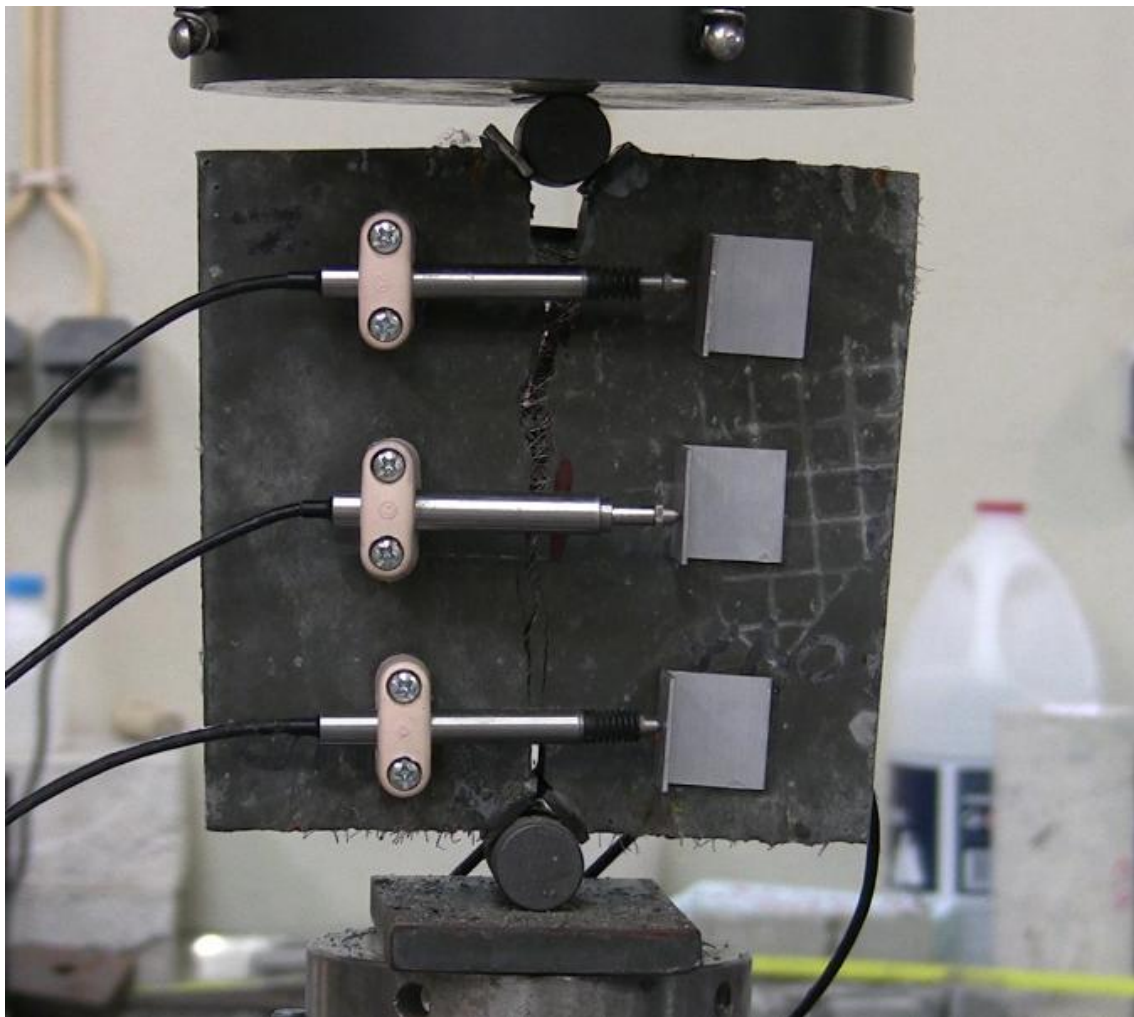


Figura 45 Provete que obteve o menor valor da tensão de pico no ensaiado, no DEWST.

Por fim, temos as amostras sem orientação que se encontram compreendidas entre as duas orientações referidas atrás. O valor da tensão média é de 7.18MPa com um desvio de padrão na ordem dos 0.3%, igual à orientação 0°, o que significa que ambas as betonagens foram regulares sendo os valores de resistência à tração razoáveis visto não ser feito qualquer tipo de orientação.

Analisando agora a abertura de fendas obtidas pelo ensaio temos também diferenças de valores como seria de esperar.

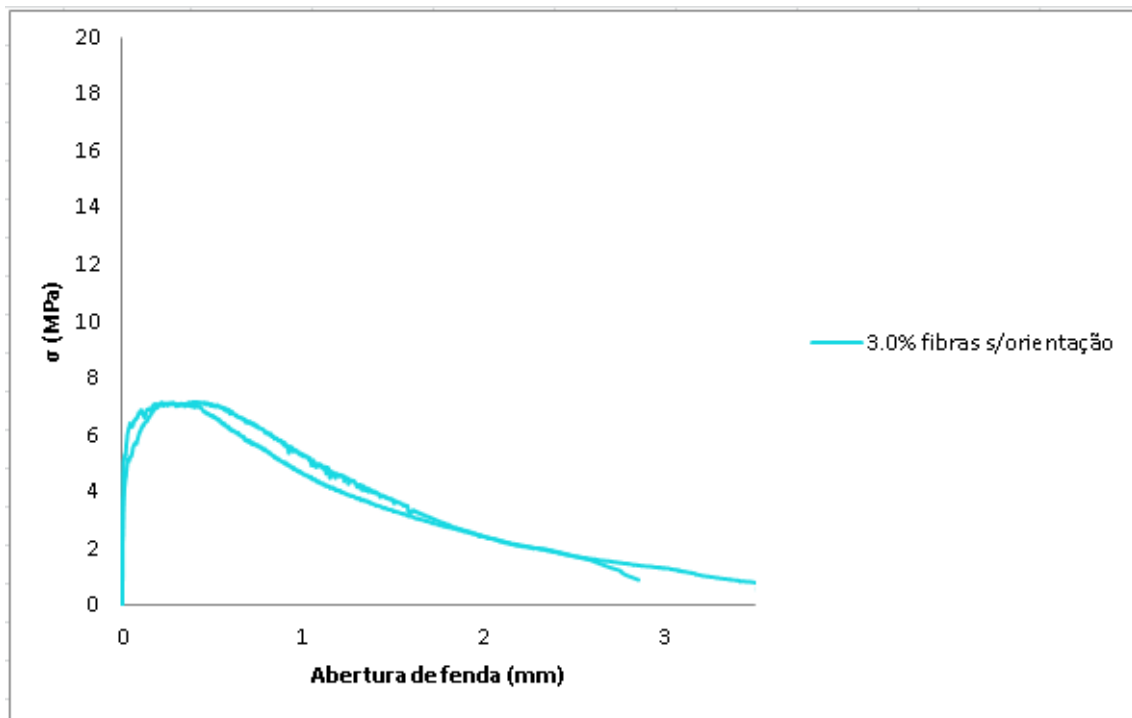


Gráfico 1 - Diagrama da tensão em função da abertura de fenda da amostra sem orientação

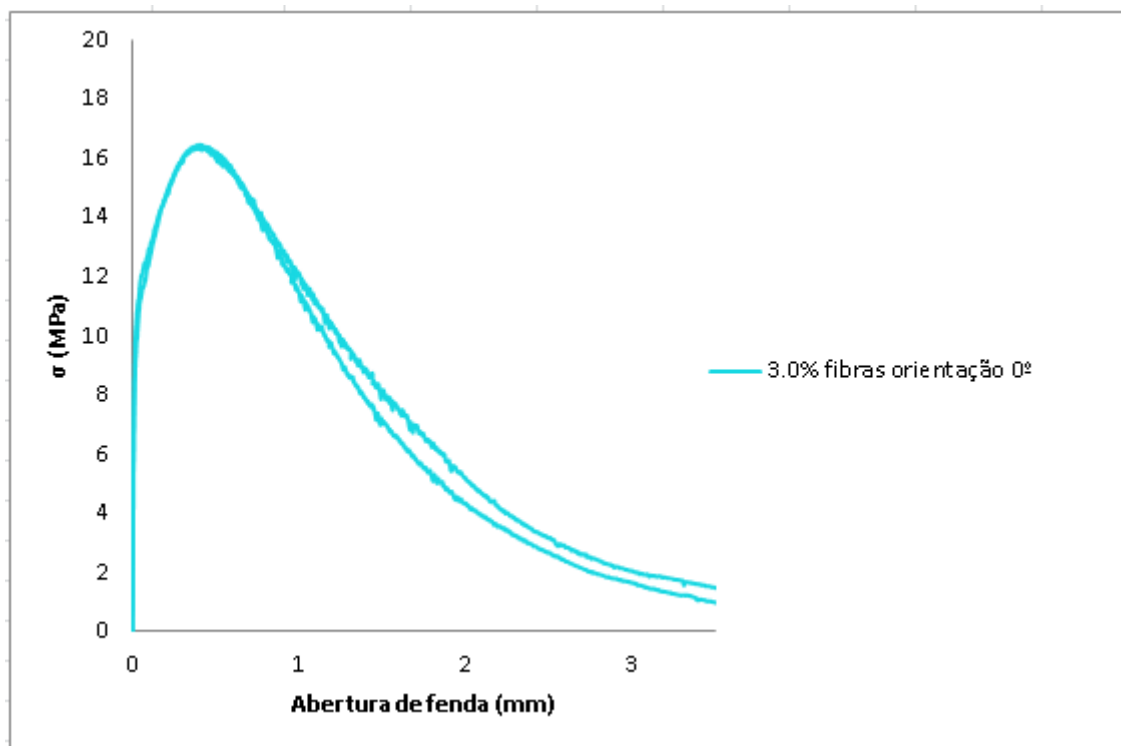


Gráfico 2 - Diagrama da tensão em função da abertura de fenda da amostra com orientação a 0°



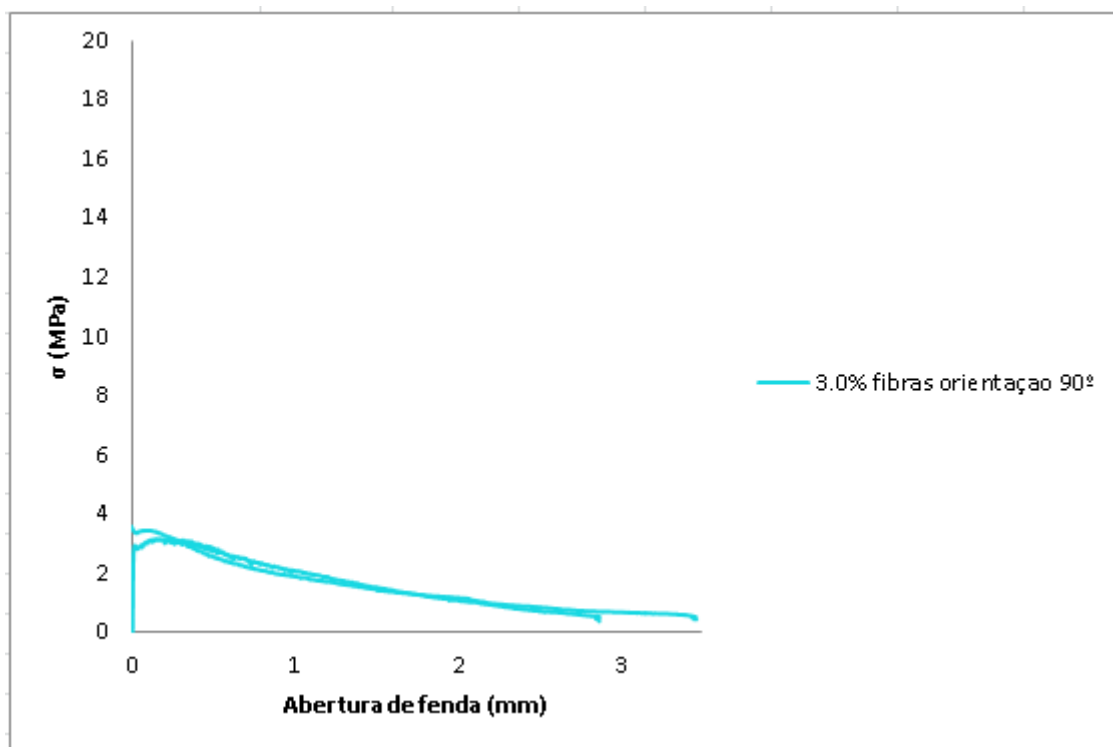


Gráfico 3 - Diagrama da tensão em função da abertura de fenda da amostra com orientação a 90°

Após análise dos três gráficos antecedentes é possível tirar algumas conclusões quanto à abertura de fendas. As amostras com orientação magnética de 0° tem uma abertura de fendas na ordem dos 0.40mm para a resistência de pico máxima. São também as amostra que tem a maior ductilidade e resistência, conseguindo atingir valores de resistência de sensivelmente 7.5MPa para uma abertura de fendas na ordem dos 1.45mm.

As amostras de orientação magnética de 90° atingem o valor máximo da tensão de pico para uma abertura de fendas praticamente nula. Por último, as amostras sem qualquer tipo de orientação voltam a exibir um comportamento dentro do espectável, com aberturas de fendas na ordem dos 0.20mm a 0.40mm para as resistências de pico, exibindo também alguma ductilidade ao longo de todo o ensaio.

No geral, após os resultados dos ensaios do DEWST, importa referir que as amostras orientadas a 90° foram as mais fracas, com resultados de resistência máxima inferiores aos das amostras sem orientação e com pouca ductilidade durante o ensaio.

## 4.4. Análise de Imagem

### 4.4.1. RECOLHA DE IMAGENS

Este subcapítulo tem o objectivo de caracterizar as fibras presentes nas amostras de betão de elevado desempenho. As amostras foram orientadas em três tipos: 0°, 90° e sem orientação, sendo posteriormente ensaiadas.

Após o ensaio das amostras, seleccionou-se em cada uma delas uma zona próxima da zona de fratura. Tal como referido anteriormente no processo de recolha de imagem através do

microscópio, a amostra requer cuidados específicos, como uma superfície plana, polida, para que possa ser devidamente analisada. Deste modo recortou-se paralelamente à zona de fratura, cerca de 12.5mm, um pedaço da peça para que se pudesse remover essa parte e assim fazer o respetivo corte das amostras pretendidas.

Este procedimento não invalida a recolha de imagem pois durante os ensaios as fibras são arrancadas no processo da formação da zona de fratura e ao fazer-se a recolha desta camada, surge uma nova face plana repleta de fibras sem qualquer tipo de arrancamento, uma vez que estas têm 9mm de comprimento.

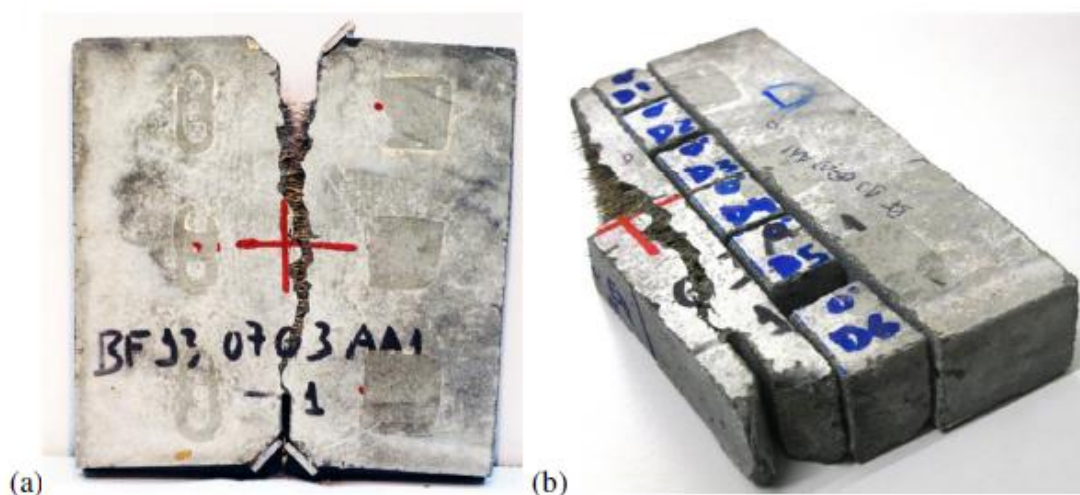


Figura 46 - (a) Amostra do ensaio DEWST; (b) Preparação da amostra para análise de imagem, corte da zona desprezável e respetiva divisão da amostra para recolha de imagem

Como se pode verificar pela imagem (b), após remoção da camada desprezável é feito o corte em paralelepípedos com dimensões 25x25x20mm, originando um total de 6 divisões. Dessas 6 divisões só são aproveitadas as 4 centrais pois é a zona central que mais contribui para a resistência da amostra no ensaio DEWST. Além disso, as zonas laterais sofrem sempre algum alinhamento das fibras em contacto com a parede, como já foi aqui referido por alguns autores acima. Das 4 amostras que vão sofrer tratamento de imagem, o polimento será feito no mesmo plano onde se deu a fratura para que se possa avaliar o efeito das fibras.



Figura 47 - Divisões e indicação da face que vai ser analisada

Após isso a imagem vai ser tratada e polida para que seja possível proceder a análise da mesma.

Perante o exposto acima, se temos 6 provetes de estudo, temos um total de 24 amostras para analisar. Deste modo será exposto no subcapítulo da recolha de imagens 6 imagens de diferentes amostras, uma de cada um dos 6 provetes ensaiados, para se ficar com uma configuração da disposição das fibras em cada um dos provetes.

#### 4.4.1.1. 1º Recolha de Imagens das amostras sem orientação

As primeiras amostras recolhidas são provenientes da betonagem sem orientação. Recolheu-se uma amostra de cada um dos provetes ensaiados sem orientação. Utilizou-se o microscópio para fotografar toda a superfície de cada uma das amostras com alguma sobreposição, para que se possa fazer a junção das imagens com o *software autostich*. Foram necessárias no total 106 e 107 fotografias do microscópio para cada uma das imagens, para se obter a representação final. O resultado obtido foi o representado a seguir.

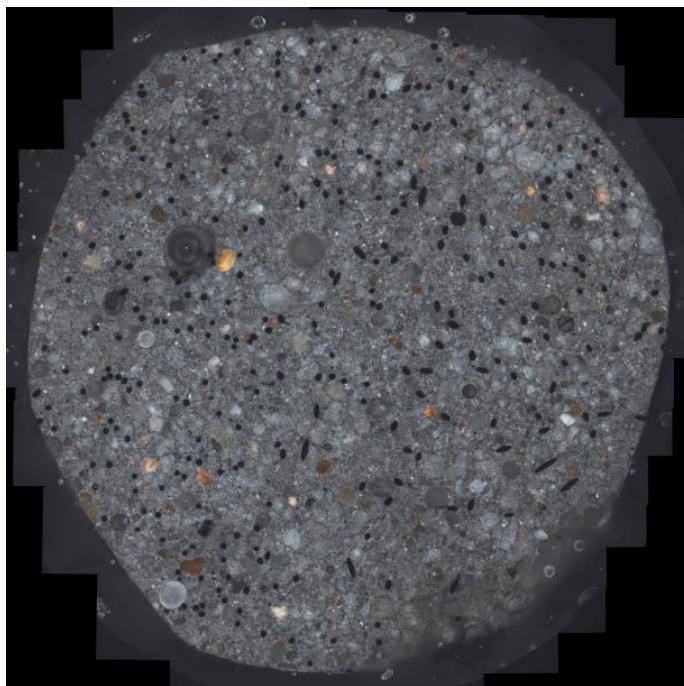


Figura 48 - Recolha de imagem da amostra “A” com 3% fibras sem orientação

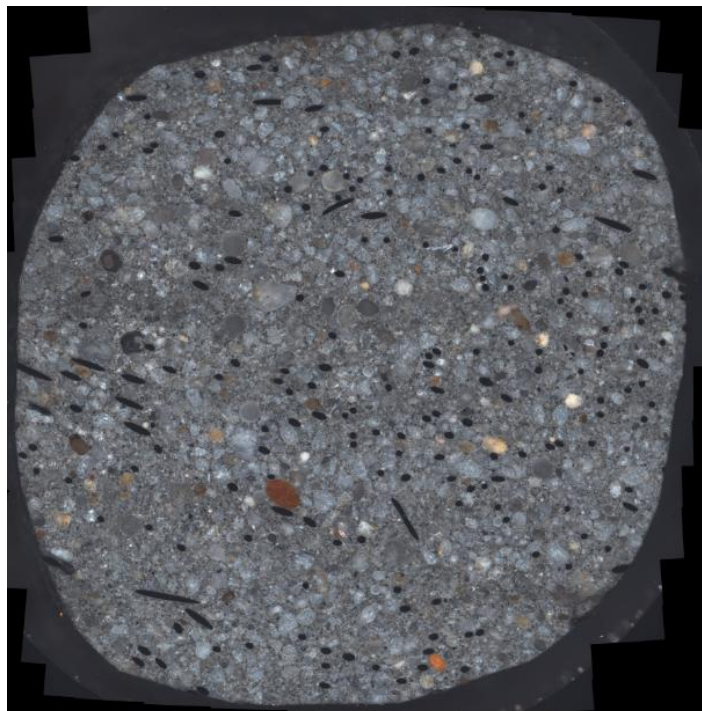


Figura 49 Recolha de imagem da amostra "B" com 3% fibras sem orientação

Como se pode observar na imagem as fibras metálicas são os pontos negros, que podem assumir diferentes formas geométricas, circulares e elipses. No entanto, poderão surgir outras formas para a representação geométrica de fibras, que surgem quando um plano de corte oblíquo intersecta uma ou as duas bases do cilindro fibra.

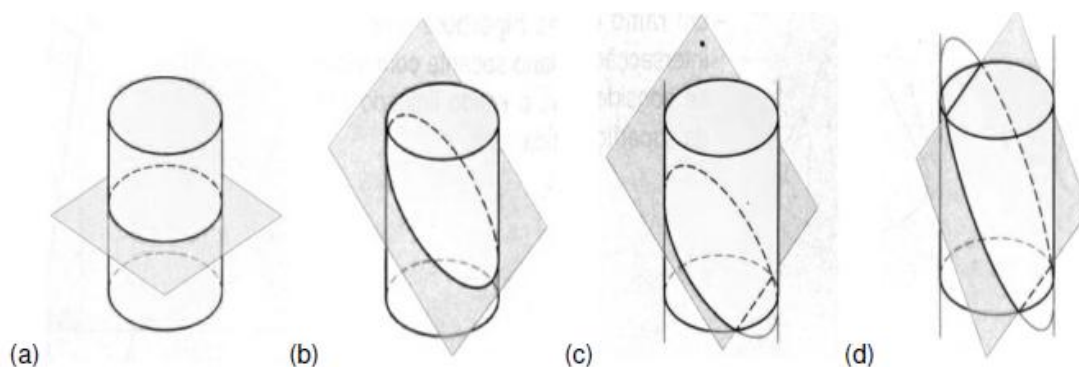


Figura 50 - Possíveis secções de cilindro: (a) círculo; (b) elipse; (c) intersecção do plano secante oblíquo com uma base; (d) intersecção de plano secante oblíquo com duas bases

Conclui-se então, sem qualquer tipo de análise analítica, apenas visual, que as fibras com forma circular estão perpendiculares ao plano de corte, as fibras em elipse encontram-se inclinadas e os outros tipos estão próximas do paralelo do plano de corte. Assim nesta amostra sem orientação, é espectável encontrar fibras de todos os tipos, já nas amostras com orientação magnética a  $0^\circ$  é espectável que todas elas sejam círculos, ao contrário da orientação magnética que se esperam elipses e muitas paralelas.



Nestas duas imagens apresentadas atrás das amostras sem orientação percebe-se que não há uma disposição uniforme das fibras em nenhuma das figuras geométricas possíveis, havendo sim diferentes formas, como expectável. Pode observar que as fibras com forma circular e em elipse em grande número e dispersas por toda a imagem. Pode-se também concluir que não houve aglomerados de fibras, havendo total dispersão das fibras ao longo de ambas as amostras.

#### 4.4.1.2. 2º Recolha de Imagens das amostras com orientação 0º

As segundas amostras recolhidas foram provenientes da orientação magnética a 0º. Estas amostras foram as que obtiveram melhores resultados nos ensaios DEWST, por isso espera-se que o processo de orientação tenha funcionado. Recolheu-se novamente imagens fotografadas pelo microscópio, num total de 125 imagens para uma 82 para outra, e o resultado obtido foi o seguinte.

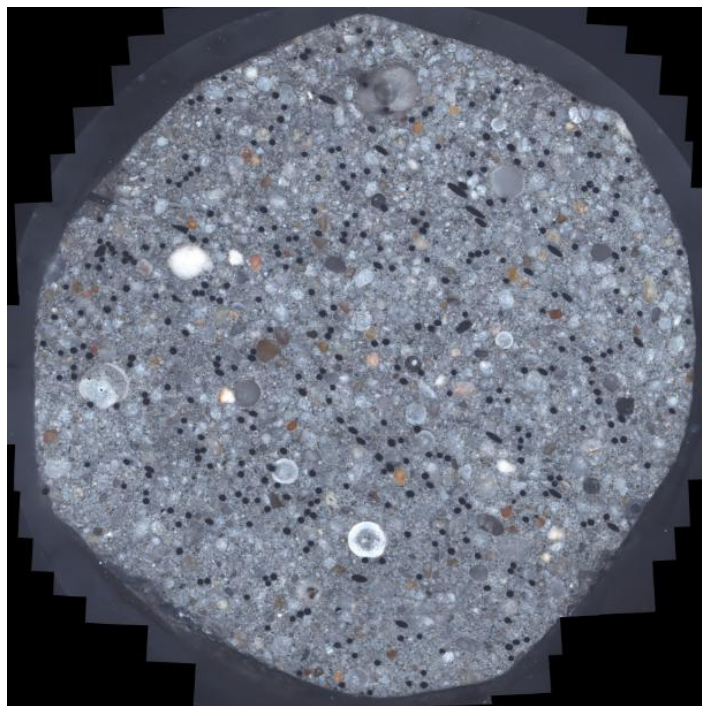


Figura 51 - Recolha de imagem da amostra "C" com 3% fibras com orientação 0º

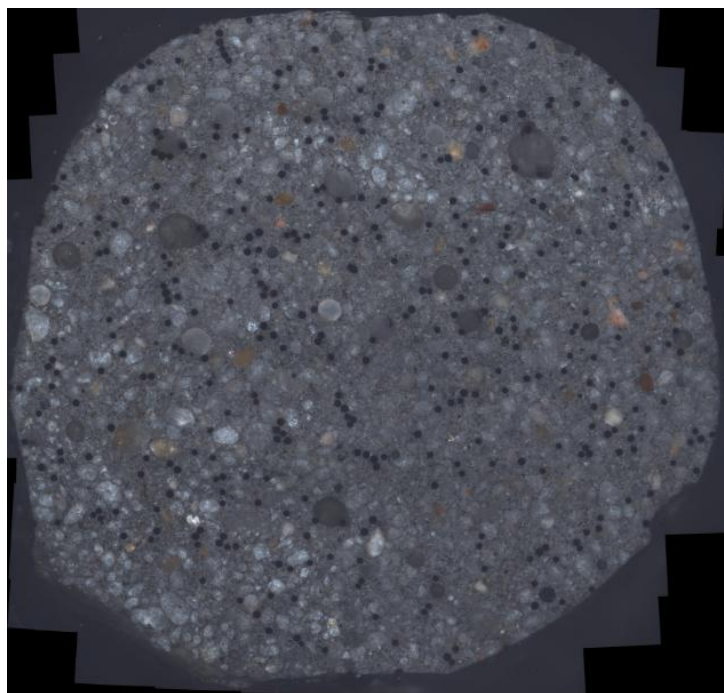


Figura 52 - Recolha de imagem da amostra “D” com 3% fibras com orientação 0°

Pelas imagens obtidas percebe-se que o método de orientação magnética a 0° funcionou. Neste tipo de amostra era previsível encontrar uma maior de fibras com formato circular e foi o que se sucedeu. No entanto, não foi uma totalidade, havendo algumas fibras com formato de elipse.

#### 4.4.1.3. 3º Recolha de Imagens das amostras com orientação 90°

Nesta última recolha, as amostras foram as orientadas a 90°. Foram as que obtiveram piores resultados nos ensaios, querendo isto dizer à partida que a orientação das fibras não foi a melhor, que é estarem orientadas a sua maioria em elipse e paralelas ao plano de corte. Para estas foram necessárias um total de 135 e 109 para cada uma delas. As imagens obtidas foram as seguintes:

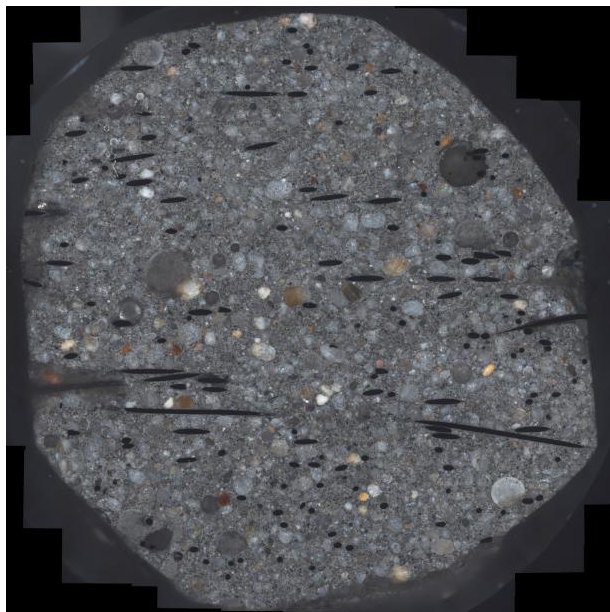


Figura 53 - Recolha de imagem da amostra “E” com 3% fibras com orientação 90°

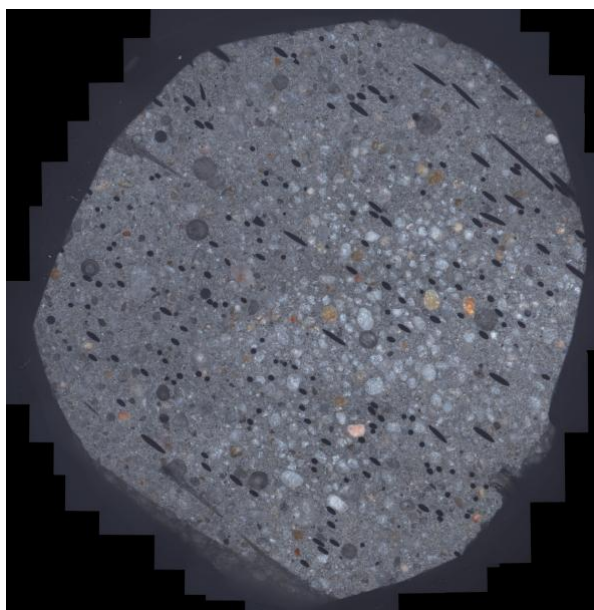


Figura 54 - Recolha de imagem da amostra “F” com 3% fibras com orientação 90°

É possível observar, nas imagens acima apresentadas, que dentro das duas amostras houve alguma discrepância na orientação das fibras. Na amostra “E” nota-se uma predominância das fibras em forma de elipse e algumas até mesmo quase paralelas ao plano de corte. Ao contrário da amostra “F”, que além da presença de fibras em forma de elipse, surgem também muitas fibras próximas do formato do círculo. Quer isto dizer que a orientação magnética a 90° teve muita dificuldade de orientação das fibras nesse sentido.

#### 4.4.2. ANÁLISE DE IMAGEM

Após recolha de imagem é agora possível fazer uma caracterização das fibras nas amostras com a utilização do *script* desenvolvido por Filipe Ribeiro. Também neste caso será apenas exemplificado o exemplo para cada uma das 6 amostras recolhidas atrás. O algoritmo permite recolher a área da amostra, o número de fibras, a inclinação das fibras em relação ao plano de corte, diâmetro mínimo e máximo, diâmetro equivalente e área de cada fibra.

##### 4.4.2.1. 1º Análise de Imagens das amostras sem orientação

A primeira etapa desde subcapítulo foi aplicar o algoritmo para contagem de fibras e determinação da área, verificando assim se estes dois parâmetros foram bem calculados. O resultado obtido das amostras sem orientação foi o seguinte.

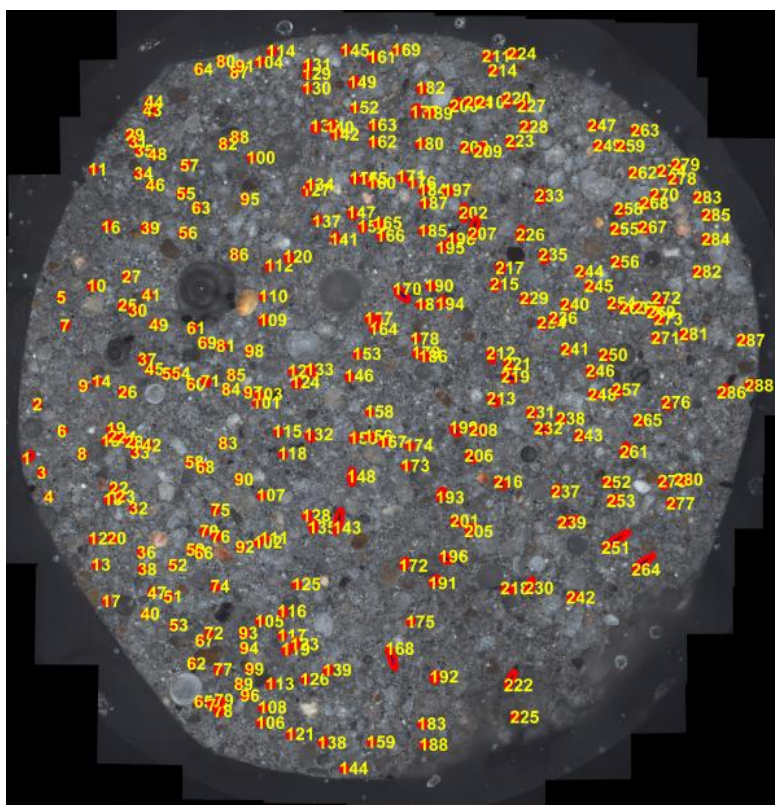


Figura 55 Identificação das fibras na amostra "A", sem orientação, através do algoritmo



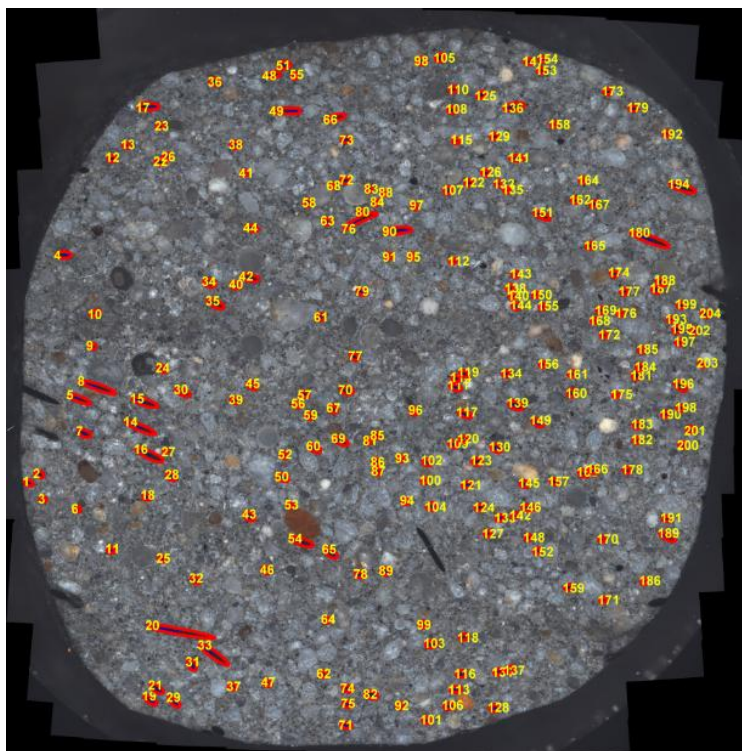


Figura 56 Identificação das fibras na amostra "B", sem orientação, através do algoritmo

A área total da amostra “A” foi de  $356\text{mm}^2$  e identificou um total de 288 fibras. Pode-se observar na imagem que o algoritmo funcionou quase na perfeição deixando apenas uma percentagem de fibras muito reduzida por contabilizar. Na amostra “B” totalizou uma contagem 204 fibras e uma área da amostra de  $352\text{mm}^2$ . Também nesta amostra o algoritmo funcionou bem com a identificação de quase todas as fibras presentes. Pode-se concluir também que ambas as amostras, feitas em separado, obtiveram resultados um pouco diferentes em relação à quantidade de fibras.

#### 4.4.2.2. 2º Análise de Imagens das amostras com orientação $0^\circ$

A segunda análise de imagem foi realizada as amostras com orientação magnética  $0^\circ$ . Pelos resultados obtidos nas amostras sem orientação, espera-se também uma boa identificação das fibras. Os resultados obtidos foram os seguintes.

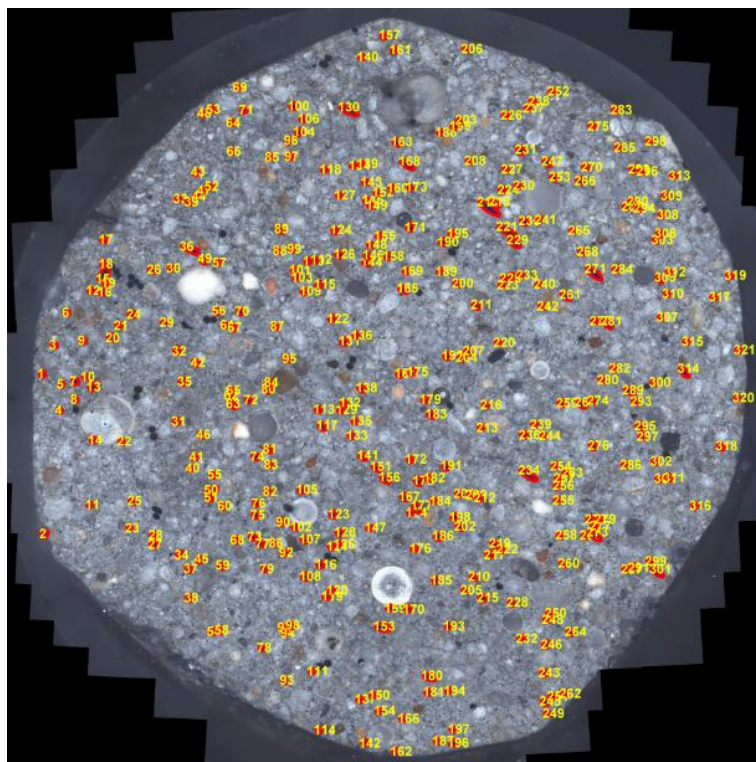


Figura 57 Identificação das fibras na amostra "C", com orientação 0°, através do algoritmo

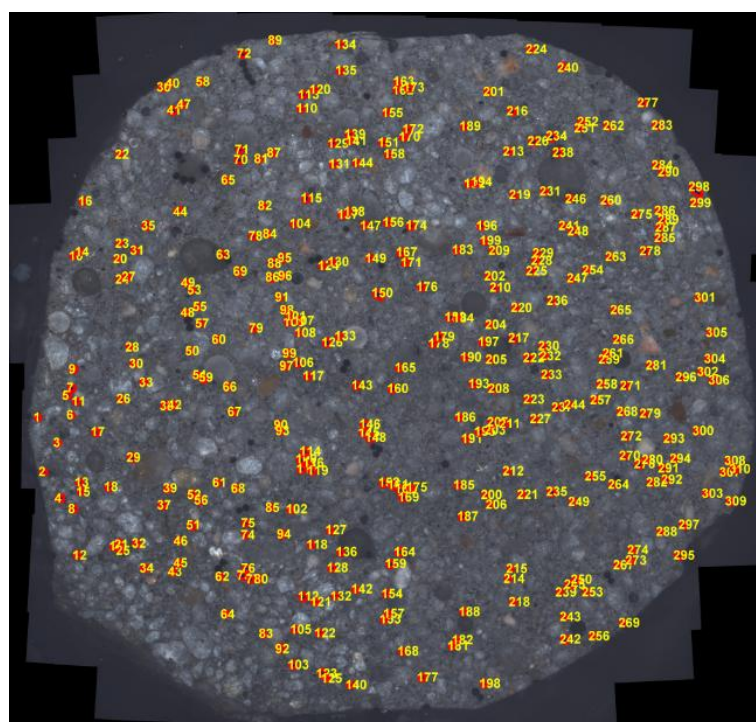


Figura 58 Identificação das fibras na amostra "D", com orientação 0°, através do algoritmo

Na amostra "C" a área é de 332mm<sup>2</sup> e contabilizou um total de 321 fibras, para a amostras "D" a área foi de 338mm<sup>2</sup> e obteve-se um total de 310 fibras. O algoritmo esteve

novamente com uma boa performance na segmentação da maior parte das fibras. Pode-se verificar que a presença de fibras na zona da abertura da rachadura foi superior nas amostras orientadas a  $0^\circ$  em relação as amostras sem orientação, em quase mais de 100 fibras.

#### 4.4.2.3. $3^\circ$ Análise de Imagens das amostras com orientação $90^\circ$

Procedemos agora às últimas amostras que são as orientadas a  $90^\circ$ . Estas amostras foram as que obtiveram os piores resultados no ensaio DEWST, por isso nesta recolha de imagem é espectável que surjam poucas fibras na zona da rachadura e também com dificuldade de orientação. Os resultados foram os seguintes.

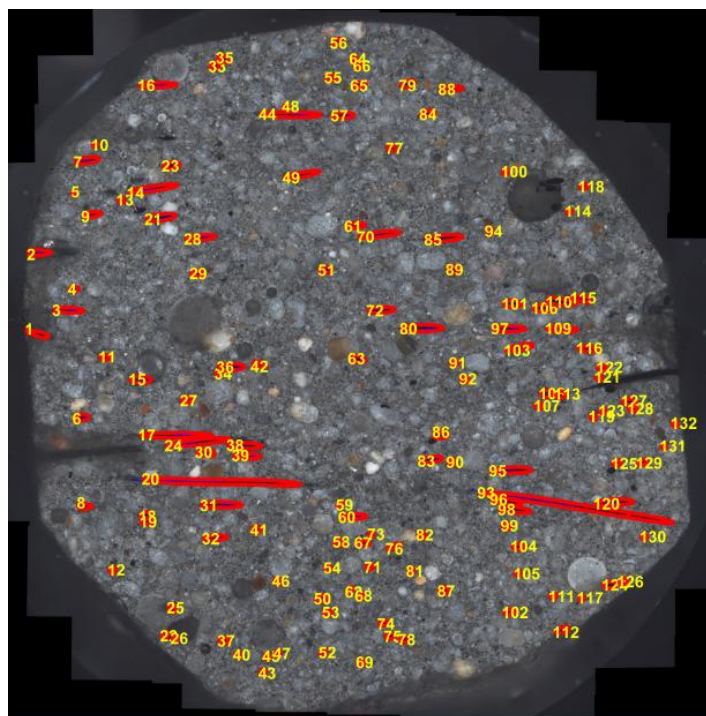


Figura 59 Identificação das fibras na amostra "E", com orientação  $90^\circ$ , através do algoritmo



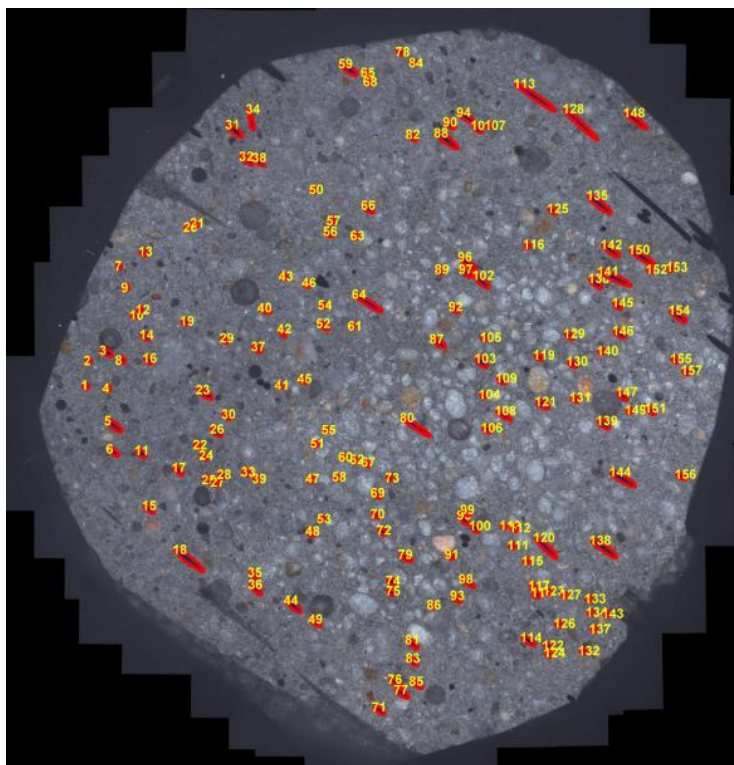


Figura 60 Identificação das fibras na amostra "F", com orientação 90°, através do algoritmo

O algoritmo identificou 132 fibras numa área  $350\text{mm}^2$  para a amostra "E" e 157 fibras numa área de  $310\text{mm}^2$  da amostra "F".

#### 4.4.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO ALGORITMO

Com o Algoritmo é possível obter os dados relativos às características das fibras. Deste modo vai ser possível fazer uma verificação da inclinação que as fibras obtiveram, para saber se o sistema de orientação foi eficaz, bem como os diâmetros maiores e mais pequenos de cada uma das fibras.

A tabela é proveniente do processamento de imagem feito pelo algoritmo desenvolvido e vai fornecer dados relativos ao número de fibras por unidade de área, diâmetro mínimo, diâmetro máximo, diâmetro equivalente, área calcula pela medição da região da fibra, área calculada através dos diâmetros obtidos de cada fibra. Os resultados são apresentados como valores médios e coeficiente de variação de cada parâmetro.

Nas 6 tabelas seguintes vão estar presentes os resultados de todas as amostras, ou seja 24 amostras no total, 4 em cada um dos provetes.

Tabela 5 Resultados do processamento de imagem da amostra A

		Orientação	Fibras/cm2	Inclinação (°)	D1 (mm)	D2 (mm)	Deq (mm) $2\sqrt{((\pi*R1*R2)/\pi)}$	Área (mm2)	Área (mm2) $(\pi*R1+R2)$
A	Média	Sem Orientação	80,9	34,70	0,248	0,181	0,209	0,036	0,035
	Desvio Padrão			16,29	0,097	0,016	0,039	0,015	0,015
	Coefficiente variação			47%	39%	9%	19%	42%	42%
A	Média	Sem Orientação	61,75	37,55	0,279	0,185	0,222	0,042	0,041
	Desvio Padrão			18,55	0,143	0,018	0,050	0,022	0,021
	Coefficiente variação			49%	51%	10%	22%	52%	53%
A	Média	Sem Orientação	49,4	46,44	0,361	0,179	0,244	0,053	0,051
	Desvio Padrão			21,51	0,249	0,016	0,076	0,040	0,039
	Coefficiente variação			46%	69%	9%	31%	76%	76%
A	Média	Sem Orientação	78,01	24,96	0,218	0,185	0,199	0,033	0,032
	Desvio Padrão			13,05	0,072	0,018	0,031	0,012	0,012
	Coefficiente variação			52%	33%	10%	15%	37%	37%

Tabela 6 Resultados do processamento da imagem da amostra B

		Orientação	Fibras/cm2	Inclinação (°)	D1 (mm)	D2 (mm)	Deq (mm) $2\sqrt{((\pi*R1*R2)/\pi)}$	Área (mm2)	Área (mm2) $(\pi*R1+R2)$
B	Média	Sem Orientação	57,95	43,24	0,320	0,185	0,235	0,048	0,047
	Desvio Padrão			18,09	0,215	0,018	0,065	0,032	0,032
	Coefficiente variação			42%	67%	10%	28%	67%	68%
B	Média	Sem Orientação	75,9	36,33	0,254	0,173	0,205	0,036	0,035
	Desvio Padrão			16,30	0,148	0,016	0,050	0,022	0,021
	Coefficiente variação			45%	58%	9%	24%	61%	61%
B	Média	Sem Orientação	62,05	36,55	0,276	0,168	0,207	0,038	0,037
	Desvio Padrão			20,66	0,218	0,017	0,064	0,030	0,030
	Coefficiente variação			57%	79%	10%	31%	81%	82%
B	Média	Sem Orientação	86,75	35,03	0,257	0,181	0,212	0,038	0,037
	Desvio Padrão			17,79	0,119	0,018	0,046	0,019	0,019
	Coefficiente variação			51%	46%	10%	21%	50%	51%

Tabela 7 Resultados do processamento da imagem da amostra C

		Orientação	Fibras/cm2	Inclinação (°)	D1 (mm)	D2 (mm)	Deq (mm) $2\sqrt{((\pi*R1*R2)/\pi)}$	Área (mm2)	Área (mm2) $(\pi*R1+R2)$
C	Média	Orientação 0°	100,3	17,75	0,191	0,174	0,181	0,027	0,026
	Desvio Padrão			9,50	0,107	0,017	0,027	0,013	0,013
	Coefficiente variação			54%	56%	10%	15%	50%	50%
C	Média	Orientação 0°	94,28	23,42	0,192	0,167	0,178	0,026	0,025
	Desvio Padrão			12,32	0,063	0,016	0,025	0,009	0,009
	Coefficiente variação			53%	33%	10%	14%	35%	36%
C	Média	Orientação 0°	96,69	27,37	0,211	0,171	0,188	0,029	0,029
	Desvio Padrão			14,79	0,077	0,016	0,033	0,012	0,012
	Coefficiente variação			54%	36%	10%	17%	41%	41%
C	Média	Orientação 0°	104,52	22,42	0,216	0,188	0,200	0,033	0,032
	Desvio Padrão			12,44	0,074	0,018	0,031	0,013	0,013
	Coefficiente variação			55%	34%	9%	16%	39%	39%

Tabela 8 Resultados do processamento da imagem da amostra D

		Orientação	Fibras/cm2	Inclinação (°)	D1 (mm)	D2 (mm)	Deq (mm) $2\sqrt{(\pi^*R1^*R2)/\pi}$	Área (mm2)	Área (mm2) $(\pi^*R1+R2)$
D	Média	Orientação 0°	99,39	20,37	0,201	0,185	0,192	0,030	0,029
	Desvio Padrão			9,09	0,026	0,020	0,020	0,006	0,006
	Coefficiente variação			45%	13%	11%	10%	21%	21%
D	Média	Orientação 0°	91,72	15,76	0,190	0,180	0,185	0,028	0,027
	Desvio Padrão			7,87	0,025	0,018	0,019	0,006	0,006
	Coefficiente variação			50%	13%	10%	10%	22%	22%
D	Média	Orientação 0°	103,01	17,34	0,194	0,181	0,187	0,029	0,028
	Desvio Padrão			8,64	0,028	0,017	0,018	0,006	0,006
	Coefficiente variação			50%	14%	10%	10%	20%	21%
D	Média	Orientação 0°	104,52	20,365	0,201	0,184	0,192	0,030	0,03
	Desvio Padrão			9,142	0,028	0,018	0,019	0,006	0,01
	Coefficiente variação			45%	14%	10%	10%	20%	21%

Tabela 9 Resultados do processamento da imagem da amostra E

		Orientação	Fibras/cm2	Inclinação (°)	D1 (mm)	D2 (mm)	Deq (mm) $2\sqrt{(\pi^*R1^*R2)/\pi}$	Área (mm2)	Área (mm2) $(\pi^*R1+R2)$
E	Média	Orientação 90°	37,72	55,85	0,608	0,181	0,301	0,088	0,087
	Desvio Padrão			21,67	0,813	0,018	0,142	0,113	0,115
	Coefficiente variação			39%	134%	10%	47%	128%	132%
E	Média	Orientação 90°	34,34	46,19	0,428	0,181	0,263	0,063	0,062
	Desvio Padrão			24,80	0,334	0,018	0,100	0,051	0,050
	Coefficiente variação			54%	78%	10%	38%	80%	81%
E	Média	Orientação 90°	36,75	46,57	0,484	0,184	0,273	0,072	0,071
	Desvio Padrão			23,68	0,518	0,021	0,128	0,077	0,078
	Coefficiente variação			51%	107%	12%	47%	107%	110%
E	Média	Orientação 90°	37,05	51,21	0,455	0,185	0,272	0,068	0,067
	Desvio Padrão			20,32	0,431	0,018	0,107	0,067	0,067
	Coefficiente variação			40%	95%	10%	39%	98%	100%

Tabela 10 Resultados do processamento da imagem da amostra F

		Orientação	Fibras/cm2	Inclinação (°)	D1 (mm)	D2 (mm)	Deq (mm) $2\sqrt{(\pi^*R1^*R2)/\pi}$	Área (mm2)	Área (mm2) $(\pi^*R1+R2)$
F	Média	Orientação 90°	56,02	43,68	0,376	0,179	0,244	0,055	0,054
	Desvio Padrão			22,29	0,419	0,017	0,095	0,063	0,063
	Coefficiente variação			51%	111%	10%	39%	115%	117%
F	Média	Orientação 90°	50,65	49,32	0,347	0,164	0,229	0,046	0,045
	Desvio Padrão			20,77	0,225	0,016	0,068	0,031	0,030
	Coefficiente variação			42%	65%	10%	30%	67%	67%
F	Média	Orientação 90°	46,69	50,08	0,461	0,182	0,271	0,068	0,067
	Desvio Padrão			23,38	0,416	0,035	0,109	0,063	0,064
	Coefficiente variação			47%	90%	19%	40%	93%	95%
F	Média	Orientação 90°	61,75	48,94	0,443	0,194	0,278	0,071	0,070
	Desvio Padrão			22,27	0,373	0,054	0,110	0,070	0,070
	Coefficiente variação			46%	84%	28%	39%	98%	100%

A primeira interpretação que se faz das tabelas anteriores é sobre o número de fibras por unidade de área das amostras. As amostras com melhores resultados foram as que tiveram uma orientação de 0°, com uma quantidade média de fibras por cm<sup>2</sup> superior a 90 fibras, ao contrário das amostras orientadas a 90° graus que em que a média de fibras encontrada é metade das orientadas a 0°. Isto significa, que no ensaio DEWST, a quantidade de fibras na zona da abertura

da fenda era bastante inferior nas amostras orientadas a  $90^\circ$ , desde logo os baixos resultados obtidos. Também é perceptível que nos provetes com orientação a  $90^\circ$  o número de fibras de cada provete diferiu, apesar de ser ligeira a diferença, significa que o método de orientação foi mais eficaz no provete “E” pois foram detectadas menos fibras, ou seja, estariam orientadas no sentido do  $90^\circ$ .

A segunda interpretação a retirar do gráfico é referente às inclinações. As inclinações mais baixas pertenceram as amostras orientadas a  $0^\circ$ , como era espectável, já as maiores inclinações pertenceram as orientadas a  $90^\circ$ , também esperado. Importa referir no entanto, que a média das inclinações das amostras orientadas a  $0^\circ$  ando numa média de  $20.33^\circ$ , relativamente próximo do objetivo, ao contrário das amostras orientadas a  $90^\circ$  que obtiveram valores médios na ordem dos  $48.98^\circ$ , que ficaram muito aquém do pretendido. As amostras sem orientação revelaram uma média de  $36.85^\circ$ .

A terceira interpretação obtida é sobre os diâmetros. Como era previsível as amostras orientadas a  $90^\circ$  iriam obter os maiores diâmetros D1. Tal acontece pois as fibras neste caso assumiam elipses bastante longas, daí o grande diâmetro obtido. O maior valor médio obtido é de 0.608 para orientação a  $90^\circ$  e o menor de 0.190 para as fibras orientadas a  $0^\circ$ . Este valor também era previsto pois na orientação a  $0^\circ$  as fibras tendiam a tomar formas geométricas próximas do círculo. O diâmetro mínimo, D2, é semelhante em todos os casos pois as fibras têm uma dimensão específica fornecida pelo fabricante que podia variar entre 0.15mm e 0.22mm. Neste casos o valor médio é 0.179 que está dentro dos parâmetros do fabricante. Quanto ao diâmetro equivalente, este indica qual o diâmetro de um círculo com a área media igual à calculada pela média das fibras.

A quarta análise do quadro incide nas áreas. Aqui confirma-se a boa medição do script, pois o cálculo da área através dos raios esteve praticamente igual ao cálculo a partir da medição de uma região da elipse.

Após a análise detalha do gráfico importa referir mais um dado de análise. Este dado é a representação gráfica dos dados obtidos da inclinação e reproduzir num histograma e polígono de frequência. Deste modo será possível ver qual o maior número de fibras orientado em determinada inclinação. Assim os histogramas obtidos para cada amostra são os seguintes.

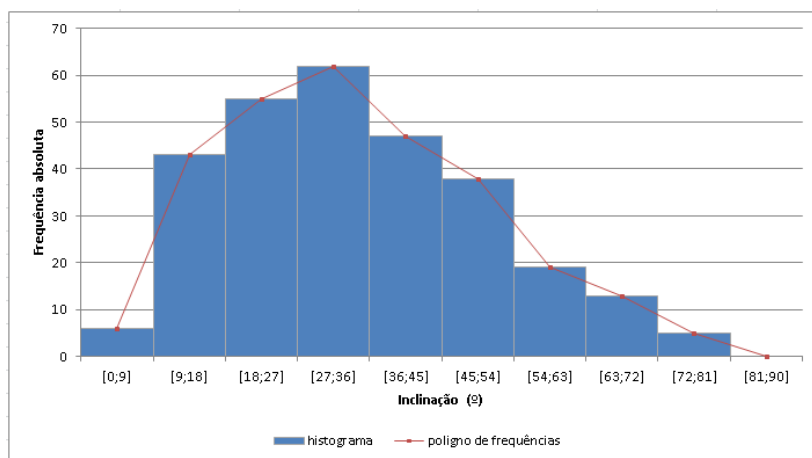


Figura 61 Histograma do provete A 1ª amostra, sem orientação

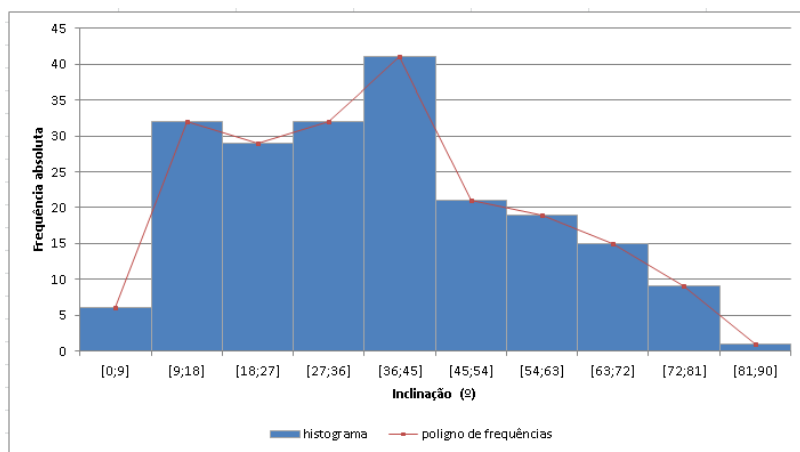


Figura 62 Histograma do provete A 2ª amostra, sem orientação

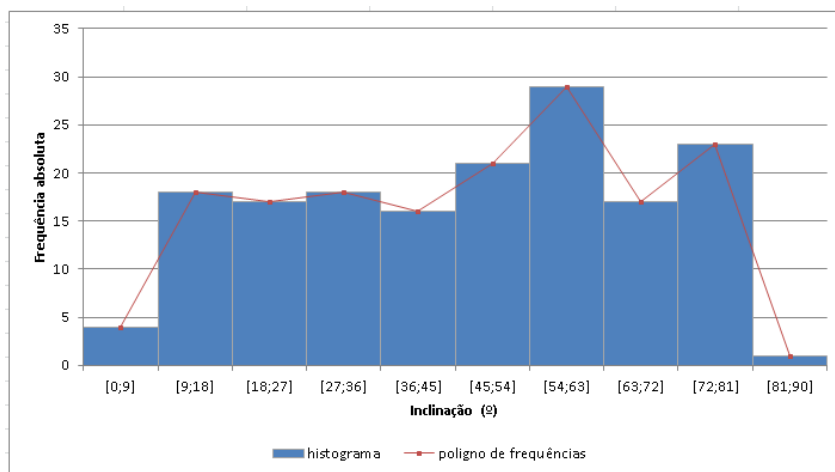


Figura 63 Histograma do provete A 3ª amostra, sem orientação

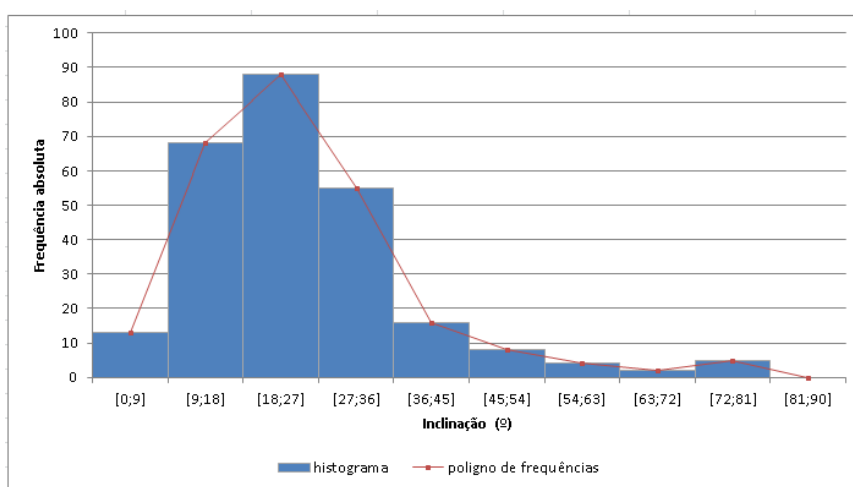


Figura 64 Histograma do provete A 4ª amostra, sem orientação



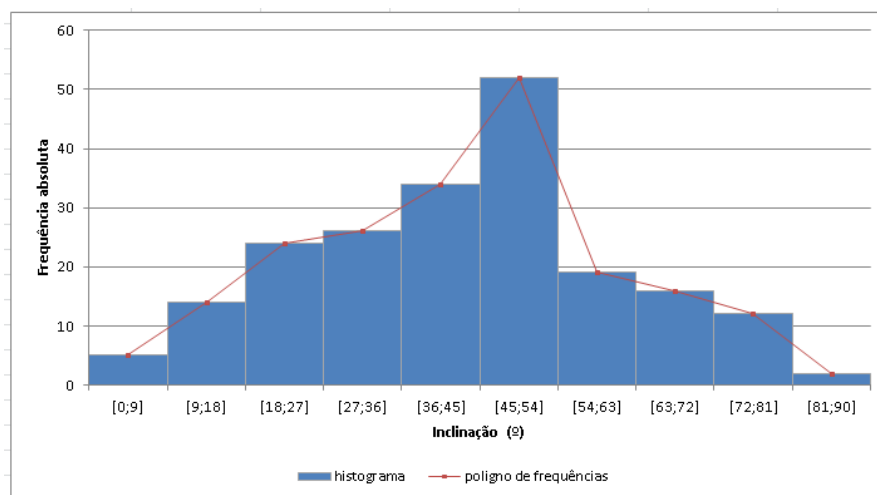


Figura 65 Histograma do provete B, 1ª amostra sem orientação

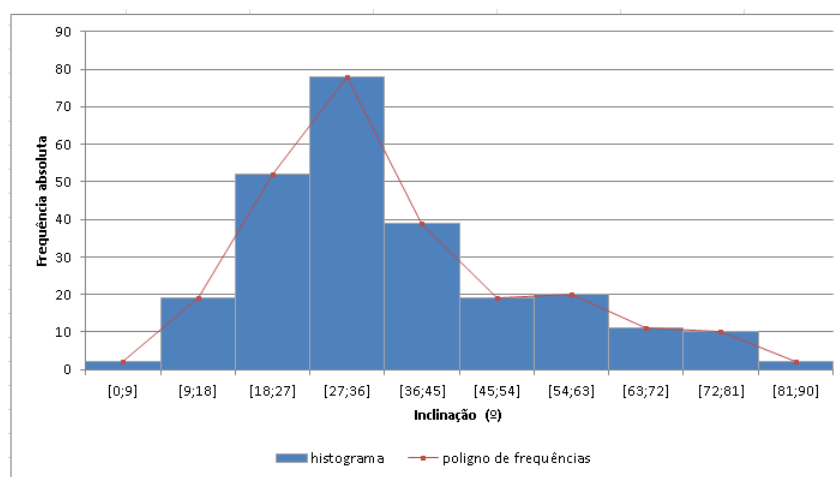


Figura 66 Histograma do provete B, 2ª amostra, sem orientação

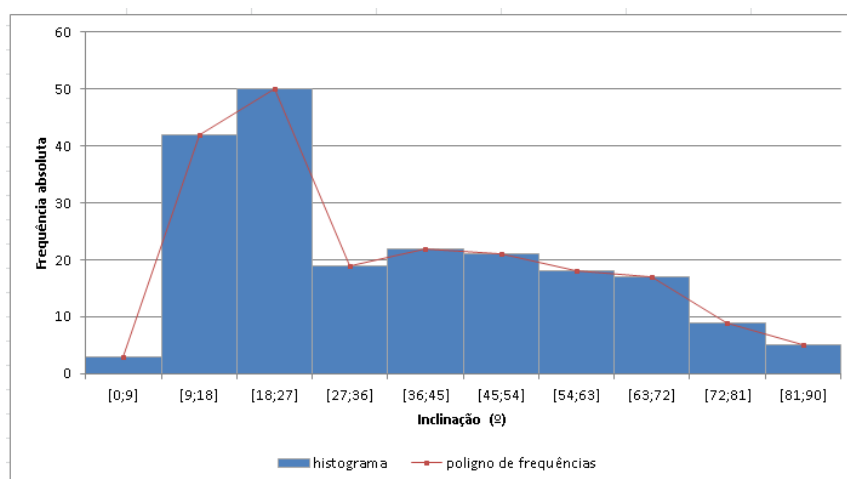


Figura 67 Histograma do provete B, 3ª amostra, sem orientação

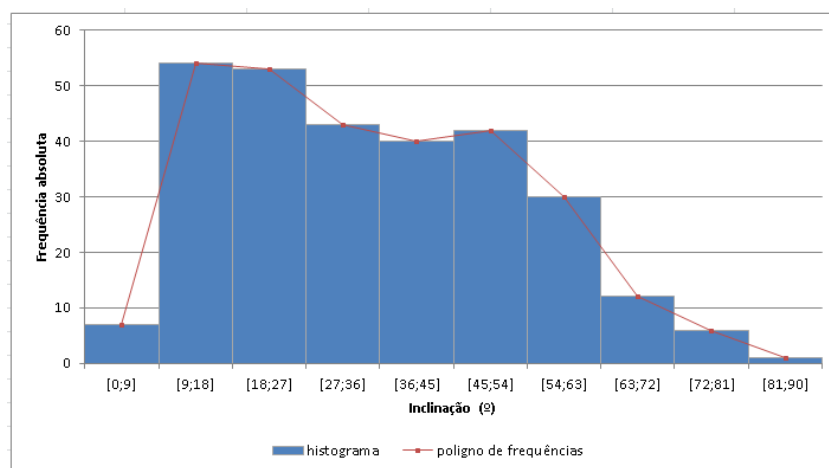


Figura 68 Histograma do provete B, 4ª amostra, sem orientação

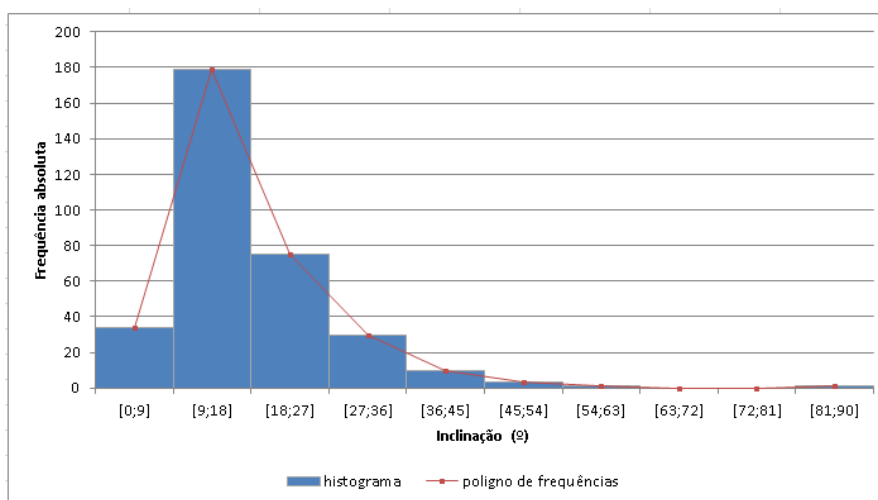


Figura 69 Histograma do provete C, 1ª amostra, orientação 0°

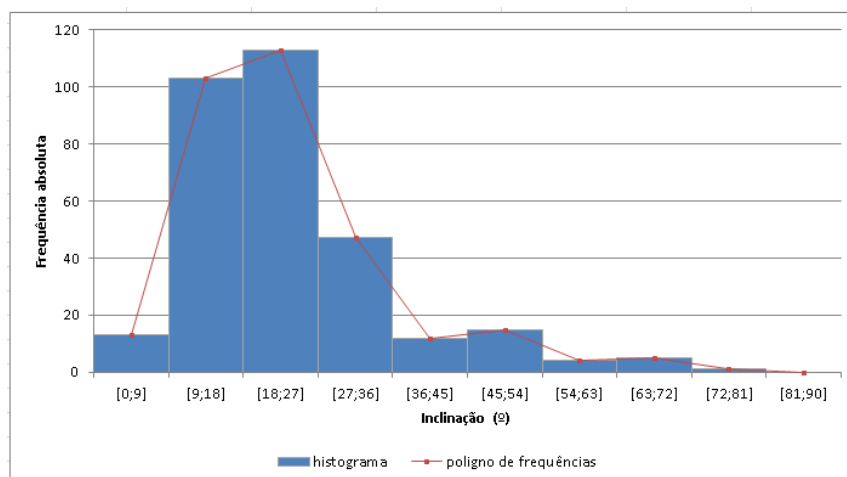


Figura 70 Histograma do provete C, 2ª amostra, orientação 0°

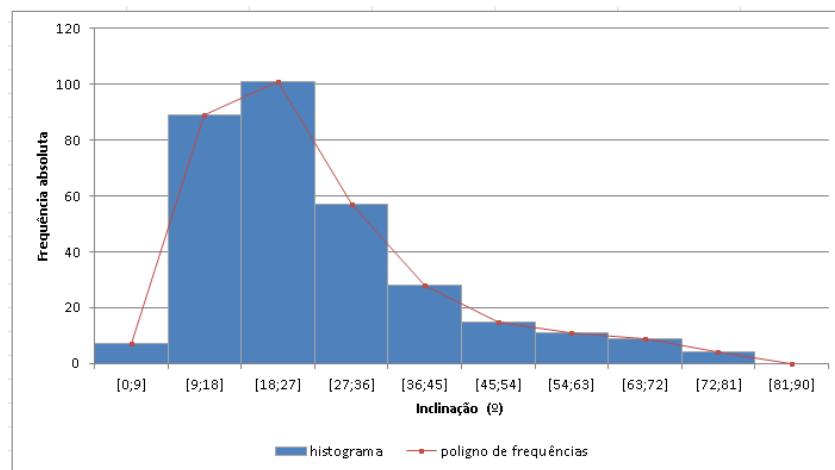


Figura 71 Histograma do provete C, 3ª amostra, orientação 0°

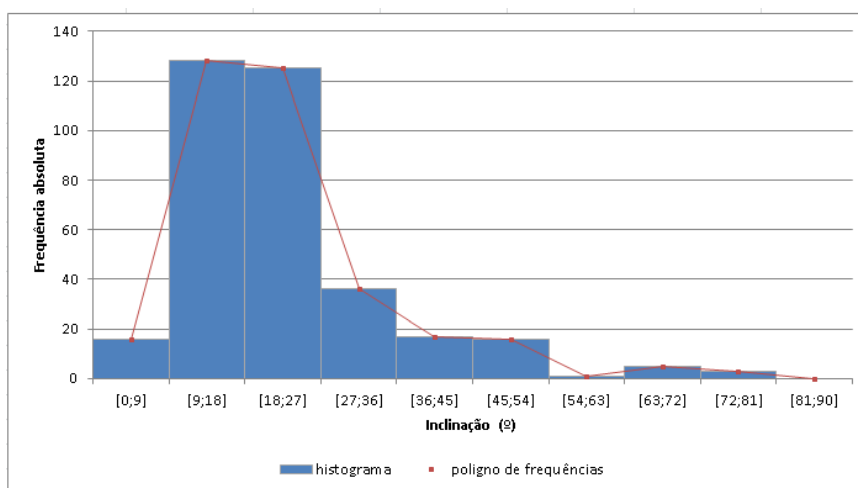


Figura 72 Histograma do provete C, 4ª amostra, orientação 0°

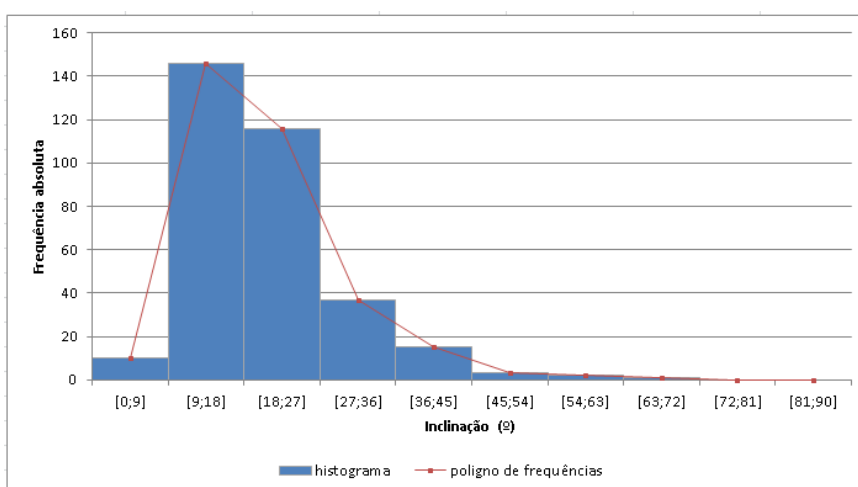


Figura 73 Histograma do provete D, 1ª amostra, orientação 0°

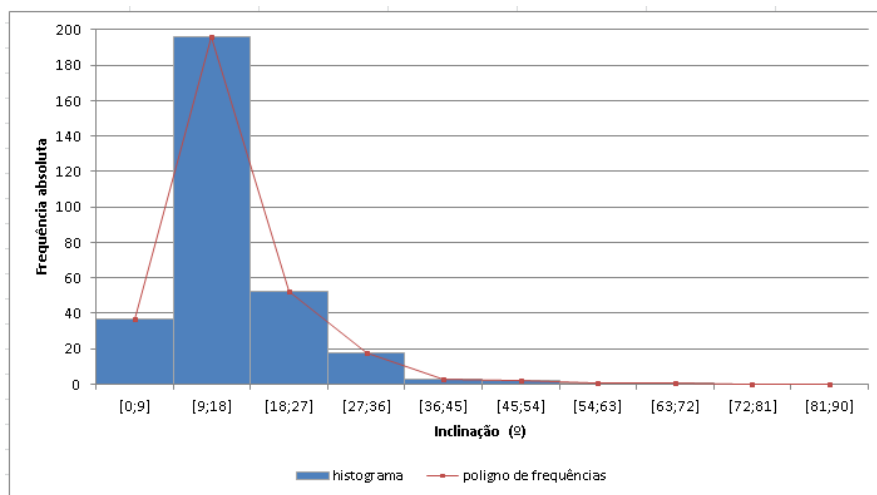


Figura 74 Histograma do provete D, 2ª amostra, orientação 0°

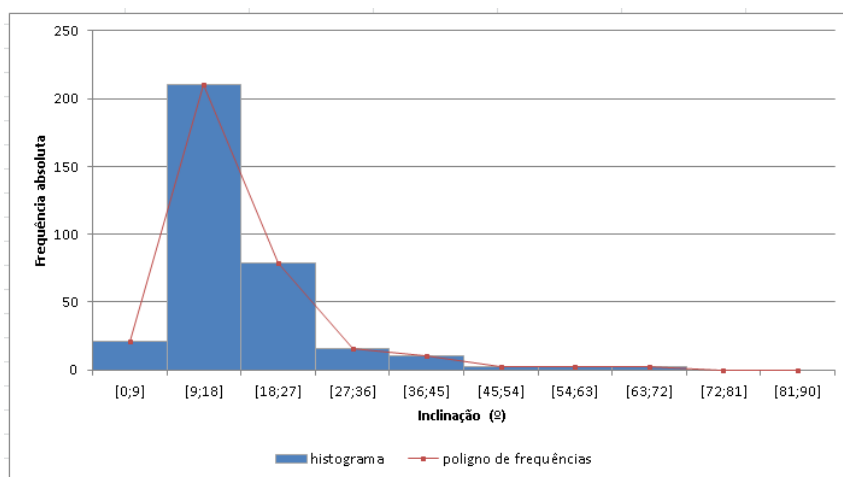


Figura 75 Histograma do provete D, 3ª amostra, orientação 0°

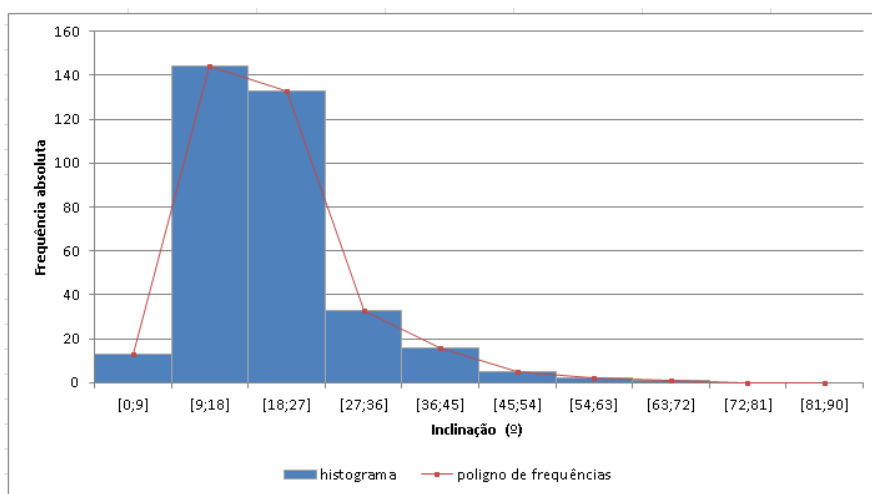


Figura 76 Histograma do provete D, 4ª amostra, orientação 0°

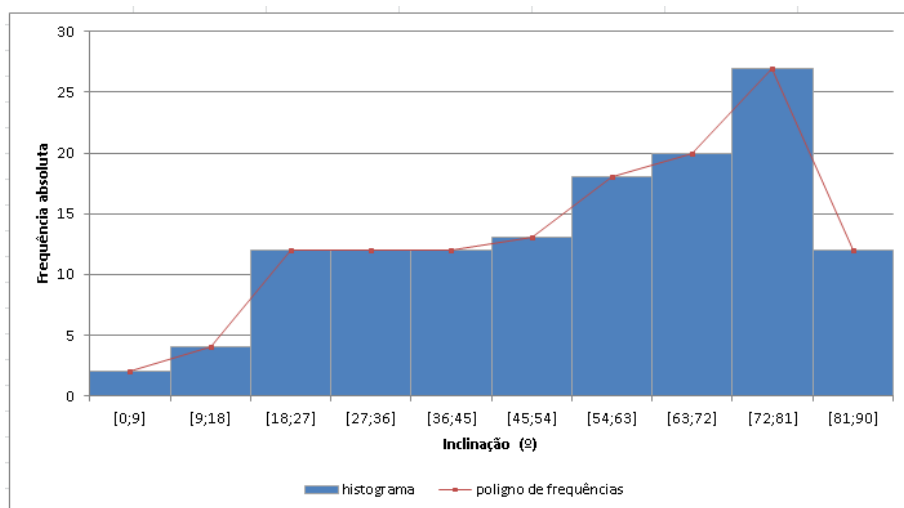


Figura 77 Histograma do provete E, 1ª amostra, orientação 90°

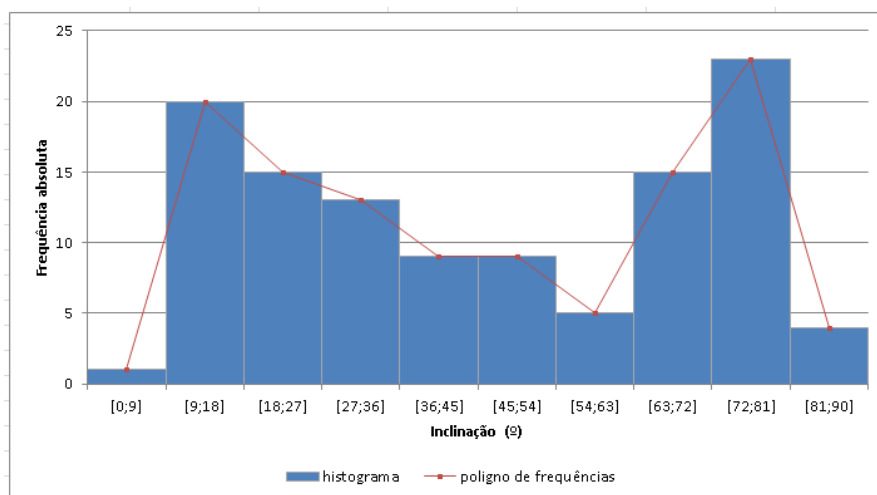


Figura 78 Histograma do provete E, 2ª amostra, orientação 90°

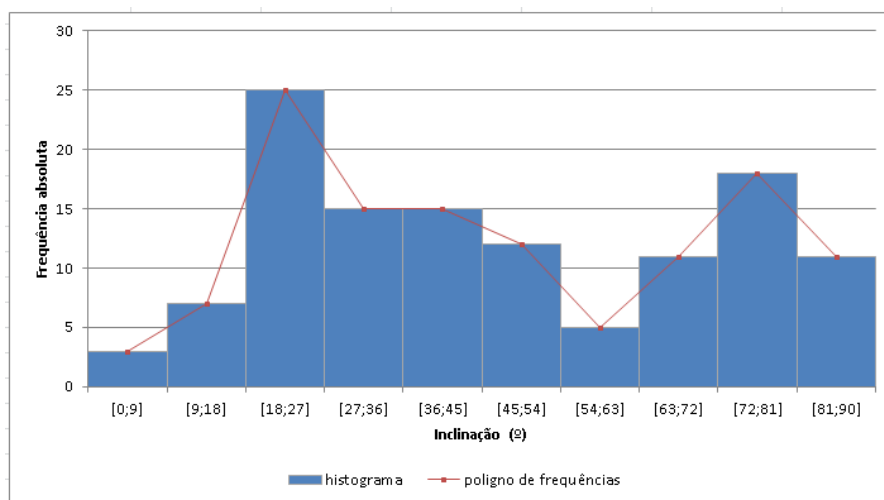


Figura 79 Histograma do provete E, 3ª amostra, orientação 90°

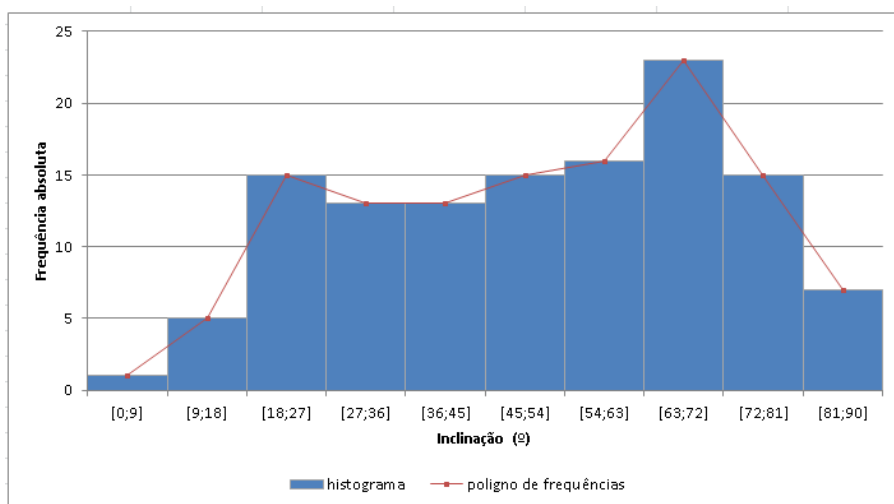


Figura 80 Histograma do provete E, 4ª amostra, orientação 90°

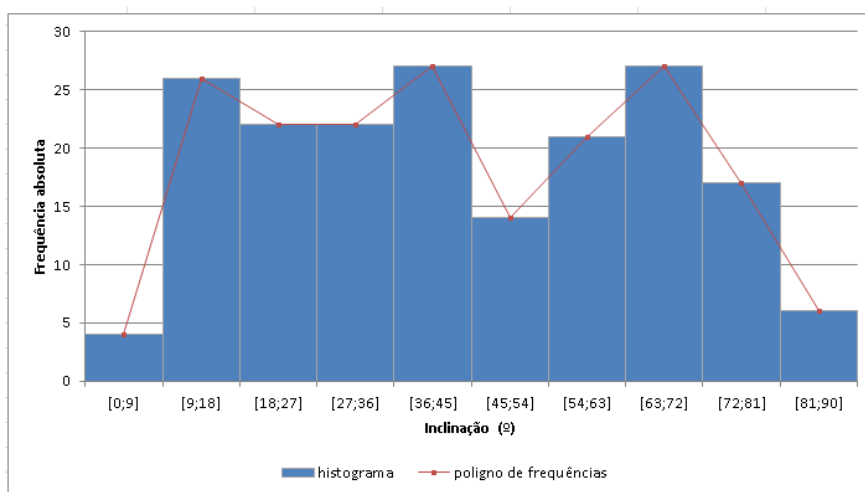


Figura 81 Histograma do provete F, 1ª amostra, orientação 90°

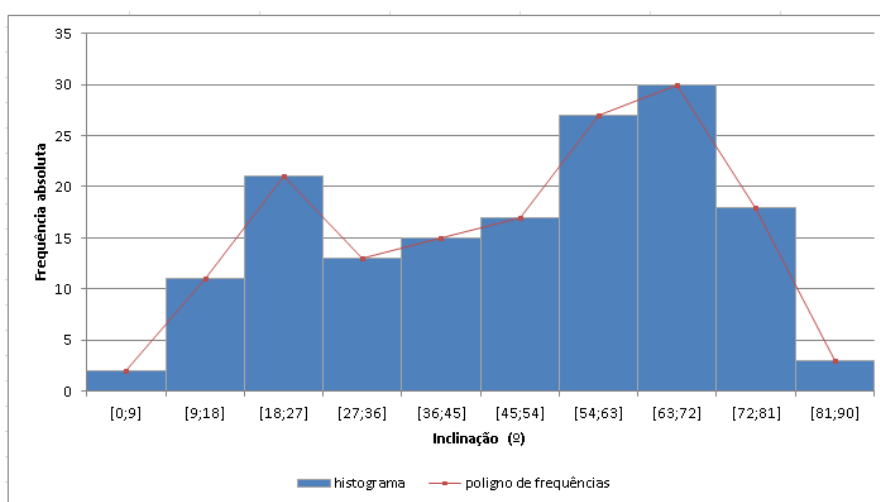


Figura 82 Histograma do provete F, 2ª amostra, orientação 90°

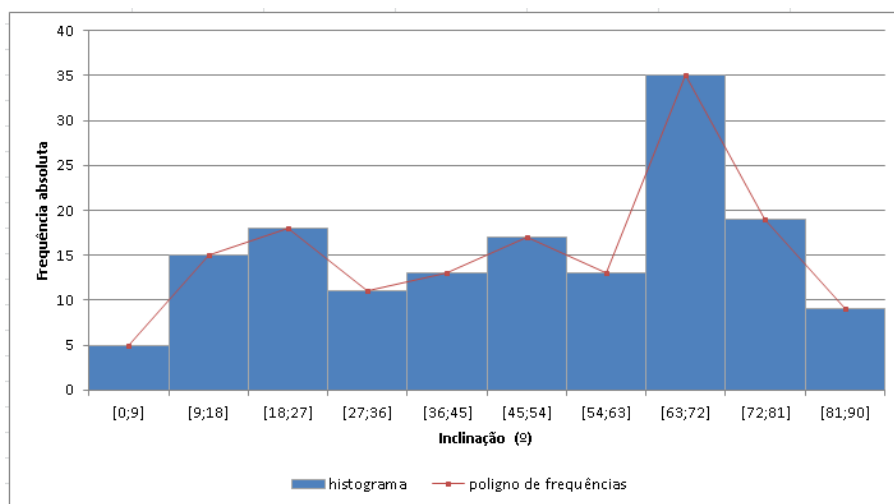


Figura 83 Histograma do provete F, 3ª amostra, orientação 90°

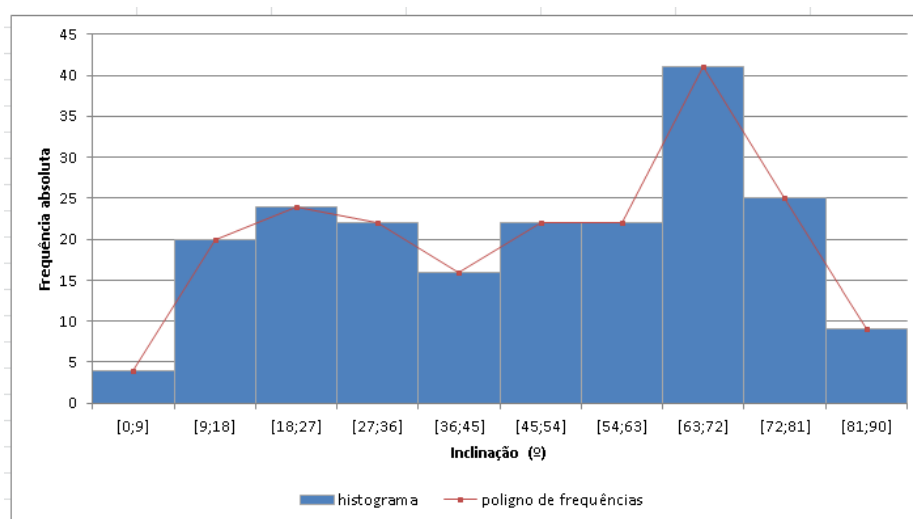


Figura 84 Histograma do provete F, 4ª amostra, orientação 90°

Da análise dos gráficos surgem mais algumas confirmações. Os dois provetes orientados a 0° tiveram uma grande concentração de dados do lado de menor inclinação, ou seja, o processo de orientação surtiu efeito, forçando as fibras a assumir uma menor inclinação. Nestes provetes a inclinação mais solicitada foi entre os 9° e 18°.

No caso dos provetes com orientação a 90° os resultados já não foram tao satisfatórios. Não existiu nenhuma classe de inclinações, talvez a ligeiramente maior seja entre 63° a 72°. Deste modo percebe-se que não conseguiu a tendência das fibras para o lado direito do histograma, onde estão as inclinações maiores.

Nos provetes sem orientação existiu no geral uma repartição por todos, havendo um caso ou outro em que teve uma tendência para aproximar mais de uma das inclinações mas nada significativo.

#### 4.5. Correlação de Resultados

Após a obtenção todas as análises de imagens e ensaios mecânicos foi agora possível correlacionarem ambos os dados. Deste modo procurou fazer uma correlação entre os valores de tensão de pico obtidos e as orientações médias das fibras.

Tabela 11 Valores dos resultados de pico e orientação médias

	Tensão de pico (MPa)	Orientação média (°)
A	7,16	35,91
B	7,19	37,79
C	16,41	22,85
D	16,47	16,55
E	3,18	49,95
F	3,67	48,00

Com estes valores foi possível obter o seguinte diagrama.

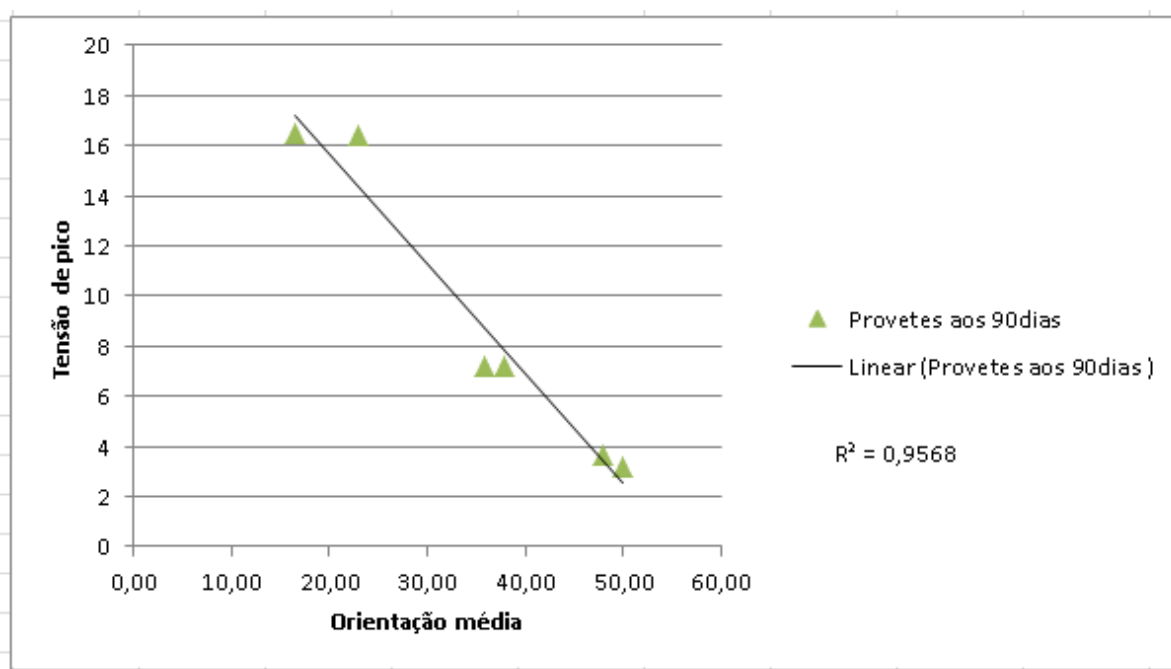


Figura 85 Correlação obtida entre tensão de pico e orientação média com uma linha de tendência linear



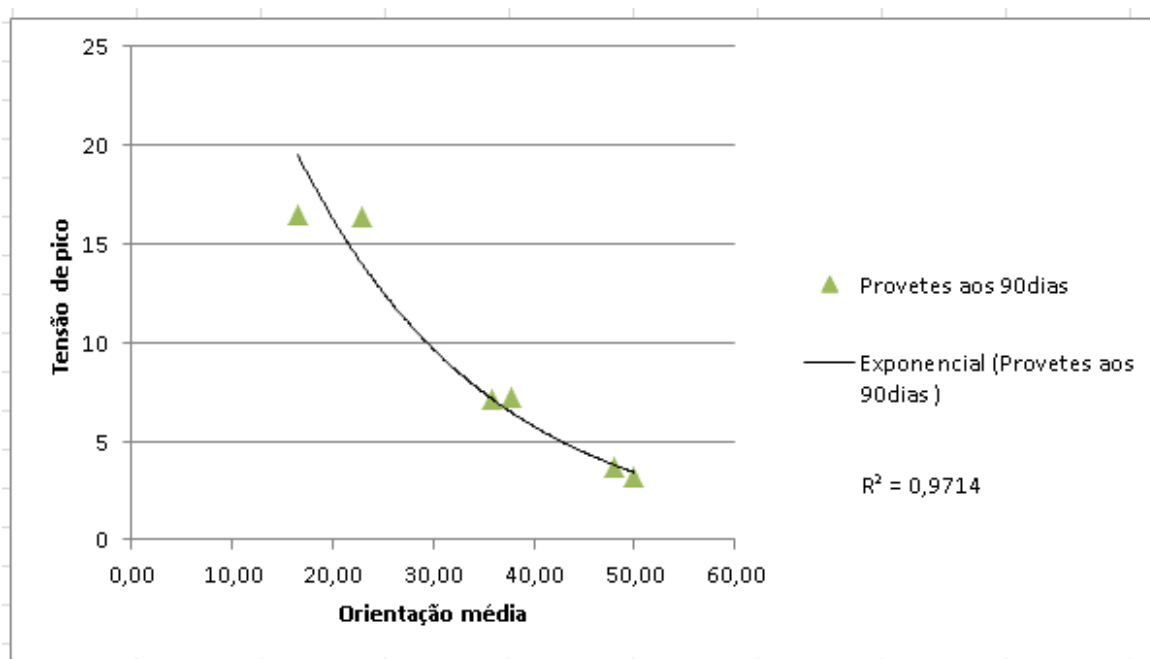


Figura 86 Correlação obtida entre tensão de pico e orientação média com uma linha de tendência exponencial

Pela observação do gráfico existe uma relação clara entre as duas variáveis. A tensão de pico tende a aumentar quanto mais a orientação das fibras tender para  $0^\circ$ , do mesmo modo que, quando as fibras orientadas tendem para  $90^\circ$  os resultados da tensão de pico são quase nulos.



# 5

## Conclusões e desenvolvimentos futuros

O objetivo da presente dissertação era conseguir fazer uma melhor caracterização da distribuição e orientação das fibras. Esse objetivo foi desenvolvido com a proposta de um método de orientação das fibras e de seguida fazer a caracterização mecânica através do ensaio DEWST e a caracterização de imagem através do algoritmo.

A primeira etapa foi a betonagem dos provetes com diferentes orientações. Para tal fizeram-se um total de seis provetes, dois para cada tipo de orientação. As orientações foram conseguidas através da orientação magnética, onde se criou um campo electromagnético que gerou um campo de linhas de força que permitiu a orientação das fibras de aço em duas direcções diferentes, 0 e 90°. Os outros dois provetes foram sem orientação para comparação de resultados.

A segunda etapa foi a caracterização mecânica dos provetes. Foi usado o DEWST que é um ensaio específico de tração para este material pois continua o ensaio mecânico mesmo após fendilhação do provete. A análise dos resultados mecânicos obtidos permitiu constatar o que se esperava. Os provetes com orientação a 0° foram os que tiveram os maiores valores de resistência de pico, com o valor máximo de 16.47MPa. Os provetes com orientação a 90° foram os que obtiveram piores resultados, nem a um quarto dos resultados da orientação a 0° conseguiram atingir, ficando-se no máximo pelos 3.67MPa. Os provetes sem orientação obtiveram valores intermédios na ordem dos 7MPa. Foi portanto possível começar por concluir que a orientação surtiu algum efeito na resistência à tração do provete e que o posicionamento das fibras paralelas ao plano da fratura não traz melhorias mecânicas ao provete.

A terceira etapa era a análise detalhada de imagem. Para se poder fazer a análise detalhada foi necessário cortar os provetes, gerando 4 amostras em cada um dos provetes. Com as amostras polidas foi possível fazer o tratamento de imagem em duas fases, uma de recolha de imagem através do microscópio ótico e outra de caracterização através do algoritmo do *matlab*. Para a parte da recolha de amostras fotografou com o microscópio ótico diversas imagens com alguma sobreposição entre elas para que depois se fizesse a junção de imagem através do *software autostich*. O algoritmo desenvolvido começou por identificar as fibras em cada amostra, a respectiva inclinação, diâmetro mínimo e máximo e áreas. Com esses dados foi possível obter um padrão da quantidade de fibras por unidade de área e da inclinação média em cada amostra. Este dado foi importante pois nos provetes com orientação a 0° conseguiu-se obter uma quantidade média superior a 90fibras por cm<sup>2</sup> na zona de fratura, ao contrário dos

provetes com orientação a 90° que ficaram com uma média de 50 fibras por cm<sup>2</sup>. Através dos dados da inclinação determinou-se o histograma de cada amostra para saber como ficaram repartidas as fibras por cada intervalo de orientações. Também aqui os provetes orientados a 0° em grande destaque com uma média de fibras orientadas no intervalo de 9° a 18° relativamente próximo do objetivo, que é 0°. Já os provetes orientados a 90° revelaram-se mais uma vez pouco eficaz, com uma dispersão das fibras por todo tipo de orientações.

Por fim, analisou-se a relação entre os resultados obtidos no ensaio mecânico e no processamento de imagem. Concluiu-se através da análise que quanto mais as fibras estiverem a tender para 0° maior será a resistência de pico, bem como o contrário, ou seja, quando as fibras tenderem para 90° a resistência de pico é só dependente da matriz cimentícia.

Além dos resultados práticos importa referir que fiquei com um conhecimento mais vasto sobre a potencialidade que este material tem à tração e durabilidade, bem como uma melhor caracterização e compreensão do UHPFRC.

Desenvolvimentos futuros passam por uma continuação na investigação da distribuição e orientação de fibras pois as fibras é que conferem ao betão grandes propriedades resistentes à tração.

## BIBLIOGRAFIA

- Aknznwa, H., Okada, K., & Mizoguchi, Y. (1977). *Method for Mixing Steel Fiber in Concrete or Mortar*, Patente N.º 814,546, EUA.
- Barnett, S., Lataste, J.-F., Parry, T., Millard, S. G., & Soutsos, M. N. (2009). *Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength*. Materials and Structures, 30 January 2009, pp. 1009-1023, RILEM.
- Marques, Domiciano. Obtido em Junho de 2014, disponível em <http://www.brasilecola.com/fisica/campo-magnetico-no-solenoide.htm>
- Engenharia Estrutural e Construção Civil. Obtido em Junho de 2014, disponível em <http://construcaocivilpet.wordpress.com/2012/11/21/concreto-de-ultra-alto-desempenho/>
- FDN-Engineering. *FDN UltraBridges*. Obtido em Maio de 2014, disponível em <http://www.ultrabridges.com/>
- Ferrara, L., Ozyurt, N., & Prisco, M. (2010). *High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of "casting-flow induced" fibre orientation*. Materials and Structures, 20 April 2010, pp. 109-128, RILEM.
- Ferrara, L., Prisco, M. D., & Lamperti, M. (2010). *Identification of the stress-crack opening behavior of HPFRCC: the role of flow-induced fiber orientation*. Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, May 23-28, 2010,, pp. 1541-1550, Oh, et al. (eds), Coreia.
- Kang, S. T., Lee, B. Y., Kim, J.-K., & Kim, Y. Y. (2010). *The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete*. Construction and Building Materials, 24 December 2010, pp. 2450-2457, Elsevier Ltd.
- Kang, S.-T., & Kim, J.-K. (2011). *Numerical simulation of the variation of fiber orientation distribution during flow molding of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPCC)*. Cement & Concrete Composites, 29 September 2011, pp. 208-217, Elsevier Ltd.
- Kang, S.-T., & Kim, J.-K. (2011). *The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCC)*. Cement and Concrete Research, 31 May 2011, pp. 1001-1014, Elsevier Ltd.
- Markovic, I. (2006). *High-Performance Hybrid-Fibre Concrete- Development and Utilisation*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Delft, DUP Science, Holanda.
- MASES Engineering Software. Obtido em Maio de 2014, disponível em <http://www.masesoft.com/904rhogammaalpha.html>
- Miller, A. I., Danderyd, & Bjorklund, F. R. (1975). *Method of Reinforcing Concrete with Fibers*. Patente N.º 596,848. EUA.
- Nezhentseva, A., Sørensen, E. V., Andersen, L. V., & Schuler, F. (2013). *Distribution and Orientation of Steel Fibres in UHPFRC*. DCE Technical Report No. 151, Abril 2013, Universidade Aalborg, Departamento de Engenharia Civil, Aalborg, Dinamarca.

Ribeiro, F. (2013). *Betão de elevado desempenho reforçado com fibras*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto.

Ribeiro, F. (2014). *Betofibra - Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade -Parte 7*. Relatório Técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto.

Ribeiro, F. (2013). *Betofibra - Betões de elevado desempenho reforçado com fibras em soluções inovadoras: conceção, caracterização e controlo de qualidade - Parte 5*. Relatório Técnico, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto.

Ribeiro, F., & Nunes, S. (24-26 de outubro de 2012). *Betão de Elevado Desempenho Reforçado com Fibras*. Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012 FEUP, 24-26 de outubro de 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto.

Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). *Composition of Reactive Powder Concrets*. High Performance Concrete, Taylor&Francis e-Library, 1995, EUA e Canada.

Schmidt, M., & Fehling, E. (2004). *Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe*. International Symposium on UHPC, Kassel, Alemanha.

Svedberg, B. (1999). *Method and Device for Magnetic Alignment for Fibers*. Patente N.º 09/720,105 . EUA.

Toutlemonde, F., Resplendino, J. (2011). *Designing and Building with UHPFRC*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2011 Grã-Bretanha e EUA.

Yoo, D.-Y., Kang, S.-t., & Yoon, Y.-S. (2014). *Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC*. Construction and Building Materials, 14 August 2014, pp. 67-81 Elsevier Ltd.

